

ЛЕСНОЙ ВЕСТНИК / FORESTRY BULLETIN

Научно-информационный журнал

№ 2 ' 2024 Том 28

Главный редактор

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

Редакционный совет журнала

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

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

Ответственный секретарь Расева Елена Александровна

Редактор Л.В. Сивай

Перевод М.А. Карлухиной

Электронная версия Ю.А. Ражской

Учредитель МГТУ им. Н.Э. Баумана

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

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-68118 от 21.12.2016

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

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

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

Дата выхода в свет 27.03.2024

Тираж 600 экз.

Заказ №

Объем 21,75 п. л.

Цена свободная

LESNOY VESTNIK / FORESTRY BULLETIN

Scientific Information journal

No. 2 ' 2024 Vol. 28

Editor-in-chief

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

Editorial council of the journal

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

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

Assistant Editor Raseva Elena Aleksandrovna

Editor L.V. Sivay

Translation by M.A. Karpukhina

Electronic version by Yu.A. Ryazhskaya

Founder BMSTU

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

Certificate on registration ПИ № ФС 77-68118 of 21.12.2016

The journal is included in the list of approved VAK of the Russian Federation for editions for the publication of works of competitors of scientific degrees

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

It has been published since 1997

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

It is sent for the press 27.03.2024
Circulation 600 copies
Order №
Volume 21,75 p. p.
Price free

СОДЕРЖАНИЕ

БИОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА

| | |
|--|----|
| Ильинцев А.С., Наквасина Е.Н., Богданов А.П., Парамонов А.А. Опыт создания лесных культур на микроповышениях при экскаваторной обработке почвы | 5 |
| Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П., Храмов Р.Н. Влияние модифицированного фотолюминофором агротекстиля спанбонд на укоренение черенков туи западной (<i>Thuja occidentalis</i> L.) | 17 |
| Тюкавина О.Н., Клевцов Д.Н., Мелехов В.И., Неверов Н.А. Теплотворная способность фракций надземной фитомассы культур сосны обыкновенной в условиях северо-таежного лесного района | 27 |
| Фролова В.А., Чернышенко О.В. Интеграция концепции экосистемных услуг в городское планирование быстрорастущих зеленых насаждений | 34 |
| Макаров Н.А., Коба В.П. Динамика сезонного прироста побегов сосны калабрийской <i>Pinus brutia</i> var. <i>pityusa</i> (Steven) Silba в Горном Крыму | 45 |
| Теребова Е.Н., Орешникова Н.В., Павлова М.А., Стародубцева А.А. Использование коры сосны обыкновенной и шунгитовой крошки для выращивания овса посевного (<i>Avena sativa</i> L.) в закрытом грунте | 55 |
| Васильев С.Б., Лавренов М.А., Кормилицына О.В. Исследование посевных качеств семян сосны Банкса (<i>Pinus Banksiana</i> Lamb.), произрастающей на почвах Егорьевского месторождения фосфоритов, трансформирующихся под влиянием пожаров | 70 |

ЛАНДШАФТНАЯ АРХИТЕКТУРА

| | |
|---|-----|
| Кругляк В.В., Гурьева Е.И., Горожанкина А.А. Архитектурно-ландшафтная среда пешеходной улицы как форма существования ландшафта в условиях города | 81 |
| Теодоронский В.С. Особенности внешнего благоустройства территории Детской городской клинической больницы № 13 имени Н.Ф. Филатова (Москва) | 93 |
| Полякова Н.В., Мурзабулатова Ф.К., Рязанова Н.А., Абдуллина Р.Г., Билалова Р.А. Древесные растения природной флоры Башкортостана в коллекциях и экспозициях Южно-Уральского ботанического сада-института (г. Уфа) | 105 |

ДЕРЕВООБРАБОТКА И ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

| | |
|---|-----|
| Михеев М.В., Комина А.В., Горбачева Г.А., Калинина А.А., Болоцкая А.В., Санаев В.Г., Столин А.М. Исследование реологического поведения измельченной древесины сосны при одноосном прессовании | 116 |
| Евдокимов Ю.М., Гапеев А.А., Прохоров В.Ю. Датирование или история природы и человечества записана не только в годичных кольцах древесины (обзор) | 127 |

ЛЕСОИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО

| | |
|---|-----|
| Сергеева Т.В., Гилязова Т.А., Рукомойников К.П. Результаты имитационного моделирования работы харвестера при выборочных рубках леса | 136 |
|---|-----|

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

| | |
|--|-----|
| Полещук О.М. Кластерный анализ Z-информации на основе эталонной системы нечетких определений принадлежности | 150 |
| Усольцев В.А., Цепордей И.С., Карабан А.А., Третьяков С.В., Коптев С.В., Парамонов А.А. Использование регрессионной модели при анализе конверсионно-объемных коэффициентов фитомассы ольхи в географических градиентах Евразии | 156 |
| Рогулин Р.С. Решение задачи формирования цепочек поставок сырья лесопромышленных предприятий с товарно-сырьевой биржи с детерминированными параметрами | 166 |

CONTENTS

BIOLOGICAL AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF FORESTRY

| | |
|---|----|
| Ilintsev A.S., Nakvasina E.N., Bogdanov A.P., Paramonov A.A. Forest crops at spot mounds after excavator soil cultivation | 5 |
| Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Khramov R.N. Effect of spunbond agrotexile modified with photoluminophore on rooting of Nothern white cedar (<i>Thuja occidentalis</i> L.) cuttings | 17 |
| Tyukavina O.N., Klevtsov D.N., Melekhov V.I., Neverov N.A. Calorific value of aerial phytomass fractions of scots pine in north taiga forest region | 27 |
| Frolova V.A., Chernyshenko O.V. Fast-growing plantations as phytoremediation of degraded lands and their ecosystem services | 34 |
| Makarov N.A., Koba V.P. <i>Pinus brutia</i> var. <i>pityusa</i> (Steven) Silba seasonal growth dynamics in Crimean Mountains | 45 |
| Terebova E.N., Oreshnikova N.V., Pavlova M.A., Starodubtseva A.A. Application of Scots pine bark and shungite chips for growing oats (<i>Avena sativa</i> L.) in protected ground | 55 |
| Vasiliev S.B., Lavrenov M.A., Kormilitsyna O.V. Progenity test of Jack pine (<i>Pinus Banksiana</i> Lamb.) seeds growing in Egoryevsk pebble-phosphate field transformed under pyrogenic factor | 70 |

LANDSCAPE ARCHITECTURE

| | |
|---|-----|
| Kruglyak V.V., Gur'eva E.I., Gorozhankina A.A. Architectural and landscape environment of pedestrian street as form of landscape existence in urban environment | 81 |
| Teodoronskiy V.S. Features of external landscaping of the Filatov Children's hospital (Moscow) territory | 93 |
| Polyakova N.V., Murzabulatova F.K., Ryazanova N.A., Abdullina R.G., Bilalova R.A. Ligneous plants of Bashkortostan's natural flora in collections and expositions of South Ural Botanical garden-institute (Ufa) | 105 |

WOODWORKING AND CHEMICAL WOOD PROCESSING

| | |
|--|-----|
| Mikheev M.V., Komina A.V., Gorbacheva G.A., Kalinina A.A., Bolotskaya A.V., Sanaev V.G., Stolin A.M. Study of disintegrated pine wood rheological behavior under uni-axial compressing | 116 |
| Evdokimov Yu.M., Gapeev A.A., Prokhorov V.Yu. Dating or history of nature and humanity recorded not only in annual wood rings (review) | 127 |

FOREST ENGINEERING

| | |
|---|-----|
| Sergeeva T.V., Gilyazova T.A., Rukomoynikov K.P. Results of harvester simulated service test during selective logging | 136 |
|---|-----|

MATH MODELING

| | |
|--|-----|
| Poleshchuk O.M. Cluster analysis of Z-information based on a reference system of fuzzy identification | 150 |
| Usoltsev V.A., Tsepordey I.S., Karaban A.A., Tretyakov S.V., Koptev S.V., Paramonov A.A. Regression model for alder biomass analysis of its conversion and expansion factors in geographical gradients of Eurasia | 156 |
| Rogulin R.S. Solving problem of forming raw material supply chains for wood enterprises from commodity exchange with deterministic parameters | 166 |

ОПЫТ СОЗДАНИЯ ЛЕСНЫХ КУЛЬТУР НА МИКРОПОВЫШЕНИЯХ ПРИ ЭКСКАВАТОРНОЙ ОБРАБОТКЕ ПОЧВЫ

А.С. Ильинцев^{1, 2✉}, Е.Н. Наквасина^{1, 2}, А.П. Богданов^{1, 2}, А.А. Парамонов¹

¹ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства» (СевНИИЛХ), Россия, 163062, г. Архангельск, ул. Никитова, д. 13

²ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), Россия, 163002, г. Архангельск, ул. Набережная Северной Двины, д. 17

a.ilintsev@narfu.ru

Представлены материалы изучения лесных культур, созданных на микроповышениях точечного типа, в условиях Двинско-Вычегодского таежного района. Проведено натурное обследование 17 лесокультурных площадей, где заложили учетные площадки для оценки качества лесных культур и обработки почвы, изучив водно-физические свойства в корнеобитаемом слое в микроповышениях и пасаках, где не было обработки почвы. Установлено, что густота лесных культур в целом соответствует нормативным показателям, заложенным в проектах искусственного лесовосстановления. Определена приживаемость лесных культур, созданных посадочным материалом с закрытой и открытой корневой системой, которая изменяется от 72 до 100 %. Самое высокое значение приживаемости приходится на первый год создания лесных культур сеянцами сосны с закрытой корневой системой, на участках двух- и трехлетних культур приживаемость несколько ниже, особенно при посадке сеянцев ели с открытыми корнями. Приведены результаты корреляционного анализа, показавшего, что наибольшее влияние на приживаемость сеянцев с открытыми корнями оказала влажность почвы ($\rho = -0,894$, $p = 0,04$). Проанализирована связь между приживаемостью сеянцев и физическими свойствами почвы в посадочных местах. Приведено сравнение свойств почвы в корнеобитаемом слое в микроповышениях и на пасаке, где не проводилась обработка почвы. Выявлено, что плотность сложения почвы в микроповышениях выше на 8 %, а влажность ниже на 11,4 %. Установлено, что это приводит к снижению общей пористости и повышению пористости аэрации в корнеобитаемом слое почвы в микроповышениях. Показано, что обработка почвы путем создания микроповышений с помощью экскаваторов в условиях Севера обеспечивает достаточно благоприятные водно-воздушные свойства посадочных мест для создания лесных культур посадочным материалом сосны и ели как с закрытой, так и открытой корневой системой.

Ключевые слова: сплошные вырубki, экскаваторная обработка почвы, физические свойства почвы, лесные культуры, густота, приживаемость

Ссылка для цитирования: Ильинцев А.С., Наквасина Е.Н., Богданов А.П., Парамонов А.А. Опыт создания лесных культур на микроповышениях при экскаваторной обработке почвы // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 2. С. 5–16. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-5-16

Методы интенсивного лесовосстановления [1], включая механизированную обработку почвы и посадку сеянцев [2], в том числе с улучшенными генетическими свойствами [3], широко распространены в практике ведения лесного хозяйства в странах Скандинавии — Финляндии, Норвегии и Швеции.

Создание микроповышений и дисковое рыхление — два наиболее распространенных механизированных способа обработки почвы [4, 5]. Приподнятые посадочные места формируются в виде дискретных микроповышений при насыпании почвы, в то время как сплошные бермы — при дисковом рыхлении. В большинстве случаев микроповышения образуются с помощью экскаватора [6]. Приподнятые посадочные места состоят из перевернутого слоя лесной подстилки, расположенной на нижележащей неповрежденной лесной подстилке, и покрыты минеральной почвой. Экскаваторная

обработка почвы путем создания микроповышений, как правило, применяется на свежих и влажных участках, где приподнятые посадочные места благоприятны для выживания посадочного материала, а дисковое рыхление, пригодное для всех типов минеральных почв и каменистых участков, не подходит для влажных участков [2].

Микроповышения рекомендуются в качестве мест посадки в различных лесорастительных условиях, поскольку питательные вещества, выделяющиеся при разложении погребенной лесной подстилки, благотворно влияют на рост посадочного материала [4]. Кроме того, приподнятое посадочное место теплее и по сравнению с пониженным, менее подвержено повреждению от морозного пучения и затопления [7–9]. В микроповышениях влажность почвы довольно низкая, так как органический слой внутри них уменьшает капиллярный поток воды снизу [7, 8, 10–12].

Различия типов почв, наличие крупных камней, пней и порубочных остатков на сплошной

вырубке формируют отличия в пределах микроповышений даже на одной лесокультурной площадке [13]. Механизированная обработка почвы обычно проводится за год до посадки, для того чтобы микроповышения слежались. Если внутри микроповышений остается много ветвей, камней или густой наземной растительности, контакт с нижележащей почвой и доступ к капиллярной кайме могут быть нарушены [7, 14].

В настоящее время экскаваторная обработка почвы приобретает все большую популярность среди крупных лесозаготовительных компаний на северо-западе России. Традиционная, с помощью плугов, обработка почвы, может быть затруднена в связи с тем, что на многих вырубках остаются большие объемы непригодной для продажи, неликвидной древесины, порубочных остатков, корней деревьев и пней. Микрорельеф также создает трудности при проведении данной обработки почвы [15]. Древесные остатки могут препятствовать работе тракторных рыхлительно-насыпных агрегатов, поскольку эти остатки имеют тенденцию к накоплению вокруг рыхлителя, что впоследствии повреждает механизм агрегата.

Такие условия, в свою очередь, влияют на качество обработки почвы: борозды или пласты становятся прерывистыми, извилистыми, а глубина обработки почвы — неравномерной. Перед обработкой почвы требуется подготовка участка, предусматривающая частичную узкополосную раскорчевку, для которой требуются специальные орудия [13, 16, 17].

Разработанной альтернативой таким тракторным операциям является экскаваторная обработка почв [18]. Гусеничный экскаватор способен свободно передвигаться на вырубке и с помощью ковша удалять порубочные остатки с отдельных мест для создания микроповышений или минерализованных площадок. Современные исследования в таежных условиях по данному вопросу пока фрагментарны [19].

Использование экскаваторной обработки почвы должно быть строго обосновано с точки зрения соблюдения технологических и экологических требований для обеспечения высокого качества работ в специфических почвенно-лесорастительных условиях. Большое значение имеет изучение положительного опыта создания культур при дискретной экскаваторной обработке почвы для разработки научно-практических рекомендаций в целях последующего внедрения такой обработки в практику ведения лесного хозяйства в условиях Севера.

Цель работы

Цель работы — оценка опыта применения дискретной (экскаваторной) обработки почвы путем

формирования микроповышений при создании лесных культур в таежных лесах для разработки научно обоснованных предложений в практику ведения лесного хозяйства.

Материалы и методы

Исследования проведены на 17 лесокультурных площадях в Двинско-Вычегодском таежном лесном районе, в том числе девять из них расположены в Котласском, пять — в Устьянском и три — в Вельском лесничествах (подзона средней тайги). Методика изучения лесных культур основана на рекомендациях, изложенных в работе [17] и нормативном документе [20]. На лесокультурных площадях закладывали учетные площадки размером 25×25 м, которые примыкали одна к другой. Количество учетных площадок зависело от однородности условий произрастания и площади вырубок. Густоту лесных культур устанавливали как число посадочных мест на единицу площади путем их подсчета на учетных площадках с последующим пересчетом на 1 га. Приживаемость рассчитали в процентах на основании количества сохранившихся особей. При определении процента приживаемости число нежизнеспособных (сомнительных) растений делили пополам и половину прибавляли к жизнеспособным.

Для оценки качества обработки почвы на каждой лесокультурной площади отбирали 10 образцов в корнеобитаемом слое почвы в микроповышениях и 10 шт. — в местах, где почва не обрабатывалась (типичные условия роста растений). Сбор и обработку образцов почвы проводили в соответствии с общепринятыми методами [21]. Образцы почвы отбирали с помощью металлического цилиндра с режущими краями (бура) объемом 52,78 см³ (диаметр 4,1 см, длина 4 см). Бур заглубляли, вдавливая его сверху вниз вручную или забивая с помощью специального направителя так, чтобы захватить середину корнеобитаемого слоя. Далее бур с почвой извлекали, подкапывали лопатой или почвенным ножом, очищали от избытка почвы. Образцы почвы переносили в заранее взвешенные и пронумерованные алюминиевые бюксы.

Все образцы почвы после сбора взвесили на аналитических весах с точностью до 0,01 г. Затем в лаборатории высушили в сушильном шкафу при температуре 105 °С до постоянной массы. После этого общепринятыми в почвоведении методами [22] определили основные водно-физические свойства почвы — полевую влажность, плотность сложения, плотность твердой фазы, общую пористость и пористость азрации.

Для проверки исследуемых выборок на нормальность распределения оценили их статисти-

Т а б л и ц а 1

Характеристика обследованных лесокультурных площадей и посадочного материала

Characteristics of the surveyed regeneration areas and planting material

| Порядковый номер лесокультурной площади | Год создания площади | Лесничество | Площадь, га | Тип лесорастительных условий | Период обработки почвы | Порода | Посадочный материал | |
|---|----------------------|-------------|-------------|------------------------------|------------------------|--------|---------------------|----------------------|
| | | | | | | | возраст, лет | тип корневой системы |
| 1 | 2020 | Котласское | 16,5 | Ельник черничный | Весна — лето | Сосна | 1–2 | Закрытая |
| 2 | 2020 | | 21,8 | | | | | |
| 3 | 2018 | | 12,1 | | | | | |
| 4 | 2017 | | 10,9 | Ельник кисличный | Весна | 2 | | |
| 5 | 2020 | | 14,6 | Ельник черничный | Весна — лето | Ель | 1–2 | |
| 6 | 2017 | | 18,7 | | Весна | Сосна | 2 | |
| 7 | 2020 | | 3 | | Весна — лето | | 1–2 | |
| 8 | 2020 | | 7,8 | | | | 1 | |
| 9 | 2022 | | 11,7 | Сосняк черничный | | | | |
| 10 | 2020 | Устьянское | 12 | Ельник черничный | Весна | Ель | 2 | Открытая |
| 11 | 2021 | | 32,2 | | | | | |
| 12 | 2021 | | 4,3 | Ельник долгомошный | Осень | | | |
| 13 | 2021 | | 15,8 | Ельник черничный | | | | |
| 14 | 2021 | | 21,2 | | | | | |
| 15 | 2021 | Вельское | 6,0 | Сосняк брусничный | Лето | Сосна | 1 | Закрытая |
| 16 | 2020 | | 18,2 | Ельник черничный | | Ель | | |
| 17 | 2020 | | 20,2 | Сосняк черничный | | Сосна | | |

ческие показатели и применили критерий Колмогорова — Смирнова. Для сравнения физических свойств между микроповышениями и необработанными участками почв применили *t*-критерий на 0,05 уровне вероятности. Для установления взаимосвязи между приживаемостью и физическими свойствами почвы применили коэффициент корреляции Спирмена (ρ). Для установления доли прямых и обратных связей применили коэффициент ранговой корреляции Кендалла (τ). Все расчеты выполнены в программе SPSS Statistics 22 (IBM Inc., Armonk, NY, USA).

Результаты и обсуждение

Лесокультурные площади (табл. 1) представлены различными лесорастительными условиями (ельниками черничными, кисличными, брусничными, долгомошными), на подзолистых почвах (типичных, глееподзолистых) разной степени оподзоливания и, как правило, легкого гранулометрического состава (песчаных, супесчаных, легко- и среднесуглинистых).

Обработка почвы на всех лесокультурных площадях была проведена тяжелыми экскаваторами со стандартным ковшом объемом 0,8...1,0 м³ (рис. 1).

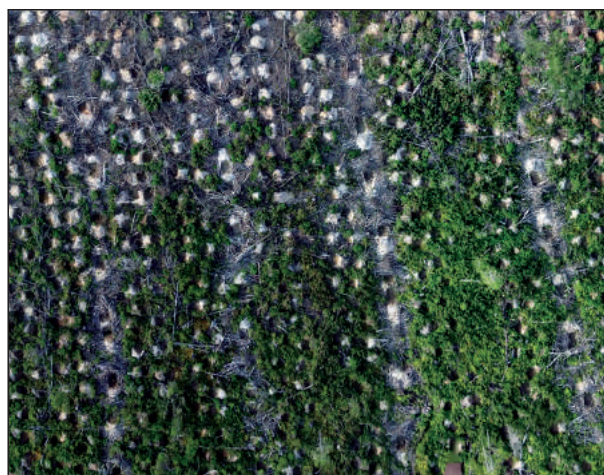


Рис. 1. Фрагмент изображения лесокультурной площади № 9, полученный с квадрокоптера (светлым показаны подготовленные посадочные места с оголенной минеральной почвой)

Fig. 1. Quadcopter image fragment of regeneration area No. 9 (prepared planting sites with bare mineral soil are shown in light)

На лесокультурных площадях сформированы микроповышения в основном через 1...1,5 м как в пасаках, так и на технологических коридорах. Сезон обработки почвы — преимущественно

Т а б л и ц а 2

Физические свойства почвы в корнеобитаемом слое на участках исследования

Physical soil properties in the rooting depth at the study sites

| Физические свойства | Пасека | Микроповышение | <i>t</i> -критерий | Вероятность, <i>p</i> |
|---|---|---|--------------------|-----------------------|
| Плотность сложения, г/см ³ среднее значение и основная ошибка интервал значений стандартное отклонение коэффициент вариации, % | 1,26 ± 0,016 0,97–1,55 0,21 16,6 | 1,36 ± 0,013 1,16–1,57 0,16 12,0 | 4,8 | 0,000002 |
| Полевая влажность % среднее значение и основная ошибка интервал значений стандартное отклонение коэффициент вариации, % | 25,5 ± 1,05 2,3–52,4 13,4 52,6 | 14,1 ± 0,45 3,2–30,6 5,8 41,4 | 10,0 | 0,000001 |
| Общая пористость, % среднее значение и основная ошибка интервал значений стандартное отклонение коэффициент вариации, % | 45,9 ± 0,74 36,1–58,5 9,7 21,0 | 40,0 ± 0,56 32,0–48,6 7,2 18,0 | 6,4 | 0,000001 |
| Пористость аэрации, % среднее значение и основная ошибка интервал значений стандартное отклонение коэффициент вариации, % | 14,6 ± 0,89 4,9–46,6 11,7 59,0 | 20,3 ± 0,81 10,3–40,5 10,6 50,5 | 4,6 | 0,000005 |

весна (перед посадкой). При осенней обработке почвы посадку лесных культур проводили на следующий год. На посадке применяли посадочные трубы Pottiputki для семян с закрытой корневой системой (ЗКС) и мечи Колесова для семян с открытой корневой системой (ОКС). На всех участках был использован стандартный районированный посадочный материал ели и сосны.

Свойства корнеобитаемого слоя в местах естественного произрастания растений (на пасеке) и на микроповышениях, подготовленных экскаваторами, различаются, что связано, прежде всего, с механизированным разрыхлением и переслаиванием горизонтов. Важно установить критичность этих различий для роста семян с ОКС и ЗКС.

Значения плотности сложения корнеобитаемого слоя почвы в пасеках (табл. 2), где не было обработки почвы, лежат в широком диапазоне от 0,97 до 1,55 г/см³ (в среднем составляет 1,26 г/см³), что объясняется изучением почв различных по гранулометрическому составу: от песчаных до легкосуглинистых.

Плотность сложения корнеобитаемого слоя в микроповышениях на 8 % выше и в среднем составляет 1,36 г/см³. Установлено достоверное различие в плотности сложения между микроповышениями и пасеками, где не было обработки почвы ($t = 4,8$, $p < 0,05$). В первую очередь это связано с обработкой почвы, при которой происходит перемешивание и вынос на поверхность микроповышений почвы из срединных горизонтов с другим, как правило, более тяжелым, гранулометрическим составом, поскольку на севере

почвенные профили имеют малую толщину и широкое развитие двучленных отложений [23].

Одним из технологических приемов при создании микроповышений в весенний и летний сезон является их уплотнение ковшем, для того чтобы создать плоское посадочное место. Учитывая почвенные особенности, в целях недопущения переуплотнения микроповышений данный технологический прием применяется только перед посадкой (при весенне-летней обработке почвы). При осенней обработке почвы микроповышения слеживаются естественным путем и дополнительное уплотнение ковшем может привести к чрезмерному уплотнению корнеобитаемого слоя почвы, что может отразиться на росте семян.

По данным разных авторов [24, 25], оптимальная плотность сложения корнеобитаемого слоя почвы для роста семян и саженцев хвойных древесных пород, в зависимости от гранулометрического состава почв, составляет 1,0...1,3 г/см³ (см. табл. 2) На суглинистых почвах явное отрицательное влияние на всхожесть семян ели оказывает плотность сложения, составляющая 1,45 г/см³ [26]. На песчаных почвах уплотнение до 1,5 г/см³ положительно влияет на приживаемость лесных культур, создаваемых как посевом, так и посадкой [27]. Таким образом, плотность сложения в изучаемых нами микроповышениях лежит в допустимых пределах для роста посадочного материала.

Полевая влажность корнеобитаемого слоя почвы в пасеках составляет от 2,3 до 52,4 % (в среднем 25,5 %) в зависимости от лесорастительных условий (см. табл. 2). Наименьшие зна-

чения влажности отмечены в лесорастительных условиях брусничного типа леса (участок № 15), где отмечается иссушение верхних горизонтов почвы в сухие летние дни. Наибольшие значения влажности отмечены в долгомошных и черничных влажных лесорастительных условиях на лесокультурных площадях № 5, 12–14, где наблюдается близкое залегание поверхностных вод, а в микропонижениях — явления застоя воды. Влажность корнеобитаемого слоя в микроповышениях составляет от 3,2 до 30,6 % (в среднем 14,1 %) и существенно ниже (на 11,4 %) по сравнению с его влажностью на пасаках, где почва не обрабатывалась ($t = 10,0, p < 0,05$). Обработка почвы на микроповышениях может вызвать подсушивание в сухих местообитаниях, однако в условиях переувлажнения позволяет снизить избыточную влажность корнеобитаемого слоя почвы, что благоприятно отражается на аэрации.

Общая пористость в верхних минеральных горизонтах в пасаках изменяется в пределах от 36,1 до 58,5 % (в среднем 45,9 %) (см. табл. 2). Наименьшие значения общей пористости отмечены в долгомошных и черничных влажных лесорастительных условиях на лесокультурных площадях № 5, 12–14. Наибольшие значения общей пористости отмечены в сухих лесорастительных условиях, например на лесокультурной площади № 15 (брусничный тип леса). Общая пористость в микроповышениях на 5,9 % ниже и изменяется в пределах от 30,2 до 48,6 % (в среднем 40,0 %). Установлено достоверное различие общей пористости между микроповышениями и пасаками, где почва не обрабатывалась ($t = 6,4, p < 0,05$).

В большинстве случаев общая пористость почв пасаек и микроповышений ниже оптимальных значений для роста растений (>50 %), установленных для пахотных горизонтов почв [28]. Исследования на различных вырубках в условиях средней тайги показывают, что для верхних минеральных горизонтов лесных почв характерны низкие значения общей пористости, которые обычно составляют от 40 до 55 % [29]. Причинами низких значений общей пористости в почвах микроповышений могут служить, как отмечалось выше, эффект уплотнения ковшем при обработке почвы, а также вынос в корнеобитаемый слой нижних горизонтов почвы с более тяжелым гранулометрическим составом.

Средние значения пористости аэрации почв на пасаках изменяются в пределах от 4,9 до 46,6 % (в среднем 14,6 %) (см. табл. 2). Наименьшие значения доли крупных пор, как и общей пористости, также отмечены на лесокультурных площадях № 5, 12–14 с полугидроморфными почвами. Наибольшие значения характерны на лесокультурных площадях № 4 и 15 в лесокультурных условиях

ельника кисличного и сосняка брусничного. Несмотря на повышение значений плотности сложения и снижение значений общей пористости в микроповышениях, пористость аэрации в их корнеобитаемом слое изменяется в пределах от 10,3 до 40,5 % (в среднем 20,3 %), что на 5,7 % выше, чем на пасаках. Установлено достоверное различие пористости аэрации между микроповышениями и пасаками, где почва не обрабатывалась ($t = 4,6, p < 0,05$). На микроповышениях, созданных в результате экскаваторной обработки, доля крупных пор в корнеобитаемом слое за счет механической перевалки почвы становится выше, а мелких (капиллярных), способных удерживать воду, — ниже.

Считается, что оптимальные значения пористости аэрации для корнеобитаемого слоя составляют от 15 до 30 % и связаны с ее гранулометрическим составом. На нижнем пределе пористости аэрации отмечается снижение роста корней растений [30–32]. Корни деревьев, как правило, хорошо функционируют при содержании кислорода в почве более 10 % [33, 34]. Рост корней прекращается при пористости аэрации на уровне 2 % [35].

Несмотря на то, что при экскаваторной обработке почвы пористость аэрации повышается по сравнению с необработанной почвой, в некоторых случаях она достигает критических значений в переуплотненных микроповышениях на части лесокультурных площадей со среднесуглинистыми почвами (черничный тип лесорастительных условий). На почвах с легким гранулометрическим составом наблюдаются излишки пористости аэрации — более 40 %, что может привести к пересыханию корней. Этот показатель (пористость аэрации) в условиях Севера может оказаться лимитирующим, обуславливая необходимость контроля, в зависимости от типа лесорастительных условий, в отношении дополнительного технологического приема по уплотнению поверхности микроповышений ковшем.

Результаты обследования лесных культур (табл. 3) показывают, что их густота в целом соответствует нормативным показателям, заложенным в проектах искусственного лесовосстановления в соответствии с установленными требованиями.

На лесокультурной площади № 9 в первый год посадки отмечено 2152 шт. семян сосны с ЗКС, что на 8 % выше нормативной густоты. На двухлетних лесокультурных площадях № 11–14, где посадка проводилась елью с ОКС, отмечено от 2555 до 2996 шт. семян. На этих участках при создании лесных культур сеянцами с ОКС была увеличена нормативная густота посадки культур на 10...15 % с учетом ожидаемого отпада. Это могло быть связано с качеством используемого

Характеристика лесных культур на момент обследования (2022 г.)

Characteristics of forest crops at the time of the survey (2022)

| № площади | Возраст культур, лет | Порода | Густота культур, шт./га | | Приживаемость, % | |
|-----------|----------------------|--------|-------------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| | | | среднее значение | основная ошибка | среднее значение | основная ошибка |
| 1 | 3 | Сосна | 1816 | 202 | 83 | 6 |
| 2 | 3 | | 1866 | 149 | 87 | 4 |
| 3 | 5 | | 1560 | 66 | 76 | 3 |
| 4 | 6 | | 1628 | 113 | 80 | 6 |
| 5 | 3 | Ель | 1792 | 69 | 87 | 3 |
| 6 | 6 | Сосна | 1680 | 107 | 82 | 5 |
| 7 | 3 | | 1840 | 48 | 91 | 2 |
| 8 | 3 | | 1856 | 24 | 92 | 1 |
| 9 | 1 | | 2152 | 40 | 100 | 0 |
| 10 | 3 | Ель | 2992 | 172 | 82 | 4 |
| 11 | 2 | | 2955 | 64 | 82 | 2 |
| 12 | 2 | | 2996 | 132 | 82 | 3 |
| 13 | 2 | | 2760 | 110 | 74 | 5 |
| 14 | 2 | | 2555 | 208 | 72 | 7 |
| 15 | 2 | Сосна | 2036 | 32 | 94 | 1 |
| 16 | 3 | Ель | 1896 | 65 | 93 | 4 |
| 17 | 3 | Сосна | 2044 | 20 | 96 | 2 |



а



б

Рис. 2. Сеянцы сосны с ЗКС на лесокультурной площади № 9 (а) и сеянцы ели с ОКС на лесокультурной площади № 12 (б)

Fig. 2. Pine forest crops created with ball-rooted tree seedlings in the planting area No. 9 (a) and Spruce seedlings with bare roots in the planting area No. 12 (b)

посадочного материала, а также с ограниченным сроком его покупки и посадки, требующим бережных хранения и транспортирования, быстрой высадки. Посадочный материал с ЗКС характеризуется более широкими сроками посадки и высокой приживаемостью [36]. Исследования [37] показали успешность использования в лесной зоне обоих видов посадочного материала.

Приживаемость лесных культур на участках исследования изменяется в пределах от 72 % до 100 % (см. табл. 3). Самая высокая приживаемость отмечается в первый год создания лес-

ных культур сеянцами с ЗКС на лесокультурной площади № 9 (рис. 2, а). На участках двух- и трехлетних культур приживаемость составляет 72...87 % (например, лесокультурные площади № 1, 2, 10–14). Низкая приживаемость отмечена при посадке сеянцев ели с ОКС (рис. 2, б).

Оценка качества лесных культур по приживаемости показывает, что в целом они удовлетворяют допустимой приживаемости — 85 %, которая установлена в действующих правилах лесовосстановления [20]. Более низкие критерии приводятся в специальной литературе, где отме-



а



б

Рис. 3. Общий вид лесных культур сосны с ЗКС (а) и искривление стволика сосны (б) на лесокультурной площади № 4

Fig. 3. General view of the forest crops created with ball-rooted tree seedlings and the curvature of the pine stem (a) in the regeneration area No. 4 (b)

чено, что приживаемость для двухлетней сосны должна быть выше 80 %, а для ели — 75 % [38]. На лесокультурных площадях № 13 и 14, где проведена посадка ели с ОКС, отмечена приживаемость ниже рекомендуемых предельных значений.

К шестилетнему возрасту культур приживаемость сосны с ЗКС составляет примерно 80 %. Несмотря на то что в напочвенном покрове доминируют такие стресс-толеранты и рудералы, как вейник тростниковидный, иван-чай узколистный, сныть обыкновенная, звездчатка жестколистная, сеянцы с ЗКС хорошо адаптировались к таким условиям (рис. 3, а). На части лесокультурных площадей наблюдается искривление стволиков сосны, которая была неудачно посажена в бок микроповышения (рис. 3, б). Сосна, произрастающая на таких участках, развивает одностороннюю корневую систему и становится неустойчивой против ветра.

В зависимости от первоначальной густоты посадки культур количество высаживаемых сеянцев с ЗКС и ОКС в одно микроповышение в среднем составляет от 2 до 5 шт. Количество создаваемых микроповышений на обследуемых лесокультурных площадях изменяется в широком диапазоне — от 653 до 1080 шт./га. Это обеспечивает заданную нормативную густоту посадки лесных культур.

Наличие порубочных остатков, пней, оставляемых деревьев может повлиять на количество/качество и расположение микроповышений на лесокультурной площади. При небольшом количестве подготовленных микроповышений количество высаженного посадочного материала с ОКС может составлять от 4 до 6 экз. на одно микроповышение (рис. 4).



Рис. 4. Лесные культуры ели с ОКС, высаженные в микроповышения на лесокультурной площади № 10

Fig. 4. Spruce forest crops with bare roots planted in spot mounding in the regeneration area no. 10

Большое количество высаженных сеянцев на одно микроповышение может отрицательно повлиять на дальнейшую приживаемость (сохранность) лесных культур, а также на последующие рост и развитие.

Проведенный корреляционный анализ (в целом по 17 лесокультурным площадям) не показал достоверную взаимосвязь между физическими свойствами корнеобитаемого слоя почвы в микроповышениях и приживаемостью лесных культур ($r = -0,182-0,176$, $p = 0,5-0,9$). Это объясняется прежде всего использованием разного посадочного материала (с ОКС или с ЗКС), сеянцы которого по-разному адаптируются при посадке на лесокультурную площадь.

На 12 площадях лесные культуры были созданы сеянцами с ЗКС, которые в первые 1–2 года после посадки не зависят от физических свойств исходной почвы, а в большей степени используют

питательные вещества кома, кроме того, корни сеянцев испытывавшие стресс, не выходят за пределы кома [39]. Вследствие этого физические свойства почвы в микроповышениях, созданных экскаваторами, не влияют на приживаемость культур с ЗКС ($\rho = -0,063-0,245$, $p = 0,4-0,8$).

При проверке связи между физическими свойствами почвы и приживаемостью сеянцев с ОКС (по пяти площадям) была установлена высокая прямая связь между приживаемостью лесных культур ели и плотностью сложения почвы в пределах $1,33...1,42$ г/см³ ($\rho = 0,783$). Однако коэффициент значимости находится на верхнем уровне статистической тенденции ($p = 0,1$), т. е. в 79 % случаев с увеличением плотности сложения почвы в микроповышениях (по крайней мере при значениях до $1,42$ г/см³) приживаемость сеянцев увеличивается. Возможно, это связано с повышением плотности почвы до определенных значений, при которых возможен успешный рост корней сеянцев, ассимилирующихся в лесной почве.

Большое влияние на приживаемость лесных культур ели с ОКС оказывает влажность корнеобитаемого слоя почвы в пределах $16,9...23,1$ %. Установлена обратная высокая связь между исследуемыми переменными ($\rho = -0,894$, $p = 0,04$). В 92 % случаях со снижением влажности в этих пределах увеличивается приживаемость культур. Фактор увлажнения является определяющим при адаптации сеянцев [36], его влияние может быть выше, чем наличие питательных веществ [40]. В то же время в условиях переувлажнения снижение избыточной влажности является важным условием для создания благоприятных почвенных условий посадочных (посевных) мест. Это необходимо для почв, где отмечается стояние близких к поверхности почвенных вод — верховодка. В осенний и весенний, а иногда и летний, периоды на Севере почвы характеризуются плохим дренажом и нарушенным водно-воздушным режимом, что часто связано с близким расположением тяжелых почвообразующих пород. Такие особенности наблюдаются в различных типах леса, в том числе в черничном, где и созданы изучаемые культуры. Поэтому на вырубках данного типа с периодическим переувлажнением требуется обработка почвы с обязательным отводом поверхностных вод (удаление излишней влаги в весенний и осенний периоды). Создаваемые экскаватором микроповышения могут быть аналогами такой обработки и обеспечивать положительный эффект.

Такие показатели физических свойств почвы в микроповышениях, как общая пористость и пористость аэрации не показали достоверной связи с приживаемостью сеянцев ели с ОКС на лесокультурных площадях ($\rho = -0,447$, $p = 0,5$; $\rho = 0,447$, $p = 0,5$).

Выводы

Опыт современной практики искусственного лесовосстановления на территории Двинско-Вычегодского лесного района показывает, что при обработке холодных и бедных почв на вырубках в условиях Севера важно наиболее рационально использовать почвенные ресурсы (водно-воздушный и тепловой режим) для повышения приживаемости лесных культур.

Обработка почвы с помощью экскаваторной техники изменяет свойства почвы в создаваемых микроповышениях, которые могут оказывать как положительный, так и отрицательный эффект для роста сеянцев. Это зависит прежде всего от типа лесорастительных условий и позволяет ориентировать исследования на разработку рекомендательных мер по совершенствованию технологических приемов их подготовки.

Оценка качества лесных культур показала, что лесные культуры сосны и ели, созданные с использованием сеянцев с ОКС и ЗКС, в большинстве случаев имеют удовлетворительное состояние и достаточно высокую приживаемость.

В дальнейшем целесообразно направить исследования на расширение набора вариантов, связанных с породой и типами лесорастительных условий, и обратить внимание на параметры адаптации сеянцев с ОКС к почвенным свойствам на лесокультурных площадях в условиях микроповышений.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФБУ «СевНИИЛХ» на проведение прикладных научных исследований (№ 122020100319-9).

Список литературы

- [1] Simonsen R., Rosvall O., Gong P., Wibe S. Profitability of measures to increase forest growth // *Forest Policy and Economics*, 2010, v. 12, no. 6, pp. 473–482.
- [2] Sikström U., Hjelm K., Hanssen K.H., Saksa T., Wallertz K. Influence of mechanical site preparation on regeneration success of planted conifers in clearcuts Fennoscandia – a review // *Silva Fennica*, 2020, v. 54, no. 2, pp. 1–35. <https://doi.org/10.14214/sf.10172>
- [3] Jansson G., Hansen J.K., Haapanen M., Kvaalen H., Steffenrem A. The genetic and economic gains from forest tree breeding programmes in Scandinavia and Finland // *Scandinavian J. of Forest Research*, 2017, v. 32, no. 4, pp. 273–286.
- [4] Häggström B., Domevsicik M., Öhlund J., Nordin A. Survival and growth of Scots pine (*Pinus sylvestris*) seedlings in north Sweden: effects of planting position and arginine phosphate addition // *Scandinavian J. of Forest Research*, 2021, v. 36, no. 6, pp. 423–433. <https://doi.org/10.1080/02827581.2021.1957999>
- [5] Luoranen J., Laine T., Saksa T. Field performance of sand-coated (Conniflex®) Norway spruce seedlings planted in mounds made by continuously advancing moulder and in

- undisturbed soil // *Forest Ecology and Management*, 2022, v. 517, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120259>
- [6] Ramantswana M., Guerra S.P.S., Ersson B.T. Advances in the mechanization of regenerating plantation forests: a review // *Curr. For. Rep.*, 2020, v. 6, no. 2, pp. 143–158. <https://doi.org/10.1007/s40725-020-00114-7>
- [7] Örlander G., Gemmel P., Hunt J. Site preparation: A Swedish overview (No. 105). BC Ministry of Forests, 1990, 62 p.
- [8] Burton P., Bedford L., Goldstein M., Osberg M. Effects of disk trench orientation and planting spot position on the ten-year performance of lodgepole pine // *New For.*, 2000, v. 20, no. 1, pp. 23–44
- [9] Langvall O., Nilsson U., Örlander G. Frost damage to planted Norway spruce seedlings — influence of site preparation and seedling type // *Forest Ecology and Management*, 2001, v. 141, no. 3, pp. 223–235.
- [10] Örlander G., Hallsby G., Gemmel P., Wilhelmsson C. Inverting improves establishment of *Pinus contorta* and *Picea abies* — 10-year results from a site preparation trial in Northern Sweden // *Scandinavian J. of Forest Research*, 1998, v. 13, no. 1–4, pp. 160–168.
- [11] de Chantal M., Leinonen K., Ilvesniemi H., Westman C.J. Combined effects of site preparation, soil properties, and sowing date on the establishment of *Pinus sylvestris* and *Picea abies* from seeds // *Canadian J. of Forest Research*, 2003, v. 33, no. 5, pp. 931–945.
- [12] Варфоломеев Л.А., Сунгуров Р.В. Почвенная экология лесных культур на Севере. Архангельск: Изд-во Северного научно-исследовательского института лесного хозяйства, 2007. 291 с.
- [13] Sutton R.F. Mounding site preparation: a review of European and north American experience // *New For.*, 1993, v. 7, no. 2, pp. 151–192.
- [14] Grossnickle S.C. Importance of root growth in overcoming planting stress // *New For.*, 2005, v. 30, no. 2–3, pp. 273–294.
- [15] Мочалов Б.А. Подготовка почвы и выбор посадочного места при создании лесных культур сосны из семян с закрытыми корнями // *ИзВУЗ Лесной журнал*, 2014. № 4. С. 9–18.
- [16] Бабич Н.А., Набатов Н.М. Лесные культуры. Архангельск: Изд-во Северного (Арктического) федерального университета, 2010. 166 с.
- [17] Малаховец П.М. Лесные культуры. Архангельск: Изд-во ИПЦ САФУ, 2012. 223 с.
- [18] Hall P. Mechanical site preparation using excavators // *New Zealand Journal of Forestry*, 1995, pp. 31–35.
- [19] Морозов А.Е., Батурич С.В. Эффективность лесовосстановления на сплошных вырубках после применения комплексов многооперационных лесозаготовительных машин в условиях Бисерского лесничества Пермского края // *Леса России и хозяйство в них*, 2020. № 2 (73). С. 50–57.
- [20] Об утверждении Правил лесовосстановления, формы, состава, порядка согласования проекта лесовосстановления, оснований для отказа в его согласовании, а также требований к формату в электронной форме проекта лесовосстановления: Приказ Минприроды России от 29.12.2021 № 1024. URL: <https://docs.cntd.ru/document/728111110> (дата обращения 01.10.2022).
- [21] Наквасина Е.Н., Серый В.С., Семенов Б.А. Полевой практикум по почвоведению. Архангельск: Изд-во Архангельского ГТУ, 2007. 127 с.
- [22] Наквасина Е.Н., Любова С.В. Почвоведение. Архангельск: Изд-во САФУ, 2016. 146 с.
- [23] Скларов Г.А., Шарова А.С. Почвы лесов Европейского Севера. М.: Наука, 1970. 271 с.
- [24] Бондарев А.Г. Физические свойства почв как теоретическая основа прогноза их уплотнения // *Влияние сельскохозяйственной техники на почву*. М.: Наука, 1981. С. 80–85.
- [25] Серый В.С., Анисеева В.А., Вялых Н.И., Кубрак Н.И. Изменение лесорастительных условий вырубках при современных лесозаготовках // *Экологические исследования в лесах Европейского Севера*. Архангельск, 1991. С. 3–15.
- [26] Соколовская Н.А., Ревут К.Б., Маркова И.А., Шевляков И.Р. Роль плотности почв при лесовосстановлении // *Лесоведение*, 1977. № 2. С. 44–55.
- [27] Серый В.С., Вялых Н.И., Крюкова М.М., Гулая З.И. Лесоводственная оценка использования валочно-трелевочных машин ЛП-49 // *Материалы отчетной сессии по итогам научно-исследовательских работ за 1989 год*. Архангельск, 1990. С. 35–37.
- [28] Шейн Е.В. Курс физики почв. М.: Изд-во МГУ, 2005. 432 с.
- [29] Ilintsev A., Bogdanov A., Nakvasina E., Amosova I., Koptev S., Tretyakov S. The natural recovery of disturbed soil, plant cover and trees after clear-cutting in the Boreal Forests, Russia // *iForest*, 2020, v. 13, pp. 531–540. <https://doi.org/10.3832/for3371-013>
- [30] Richards D., Cockroft B. Soil physical properties and root concentrations in an irrigated apple orchard // *Australian J. of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 1974, v. 14, pp. 103–107.
- [31] Page-Dumroese D.S., Harvey A.E., Jurgensen M.F., Amaranthus M.P. Impacts of soil compaction and tree stump removal on soil properties and outplanted seedlings in northern Idaho, USA // *Canadian J. of Forest Research*, 1998, v. 28, pp. 29–34. <https://doi.org/10.4141/S97-022>
- [32] Карпечко А.Ю. Изменение плотности и коренасыщенности почв под влиянием лесозаготовительной техники в еловых лесах южной Карелии // *Лесоведение*, 2008. № 5. С. 66–70.
- [33] Grable A.R., Siemer E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potentials, and elongation of corn roots // *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1968, v. 32, pp. 180–186.
- [34] Kozłowski T.T. Soil aeration, flooding and tree growth // *J. of Arboriculture*, 1985, v. 11, pp. 85–96.
- [35] Osman K.T. *Forest Soils: Properties and Management*. Switzerland: Springer Science & Business Media, 2013, 217 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02541-4_2
- [36] Бартевев И.М. К вопросу создания лесных культур посадкой ПЗМК // *Лесотехнический журнал*, 2013. № 2. С. 123–130.
- [37] Мочалов Б.А., Сеньков А.О. Рост семян сосны с закрытыми и открытыми корнями в культурах таежной зоны // *ИзВУЗ Лесной журнал*, 2007. № 4. С. 145–147.
- [38] Львов П.Н., Ипатов Л.Ф., Клинов Р.Н., Наквасина Е.Н. Планирование и организация работ по естественному и искусственному лесовосстановлению в зоне тайги: технические указания. Архангельск: РИО АЛТИ, 1986. 36 с.
- [39] Гладинов А.Н., Коновалова Е.В., Сдобоева С.С. Сравнительные результаты использования семян сосны обыкновенной с открытой и закрытой корневой системой при искусственном лесовосстановлении в условиях Западного Забайкалья // *Успехи современного естествознания*, 2021. № 11. С. 7–12.
- [40] Nzokou P., Cregg B.M. Morphology and foliar chemistry of containerized *Abies fraseri* (Pursh) Poir. seedlings as affected by water availability and nutrition // *Annals of Forest Science*, 2010, v. 67, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1051/forest/2010015>

Сведения об авторах

Ильинцев Алексей Сергеевич✉ — канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр., ФБУ «СевНИИЛХ», доцент кафедры лесоводства и лесоустройства, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», a.ilintsev@narfu.ru

Наквасина Елена Николаевна — д-р. с.-х. наук, проф., ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»; вед. науч. сотр., ФБУ «СевНИИЛХ», nakvasina@yandex.ru

Богданов Александр Петрович — канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр., ФБУ «СевНИИЛХ», доцент кафедры лесоводства и лесоустройства, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», aleksandr_bogd@mail.ru

Парамонов Андрей Алексеевич — канд. с.-х. наук, науч. сотр., ФБУ «СевНИИЛХ», a.paramonov@sevniih-arh.ru

Поступила в редакцию 30.03.2023.

Одобрено после рецензирования 08.11.2023.

Принята к публикации 06.02.2024.

FOREST CROPS AT SPOT MOUNDS AFTER EXCAVATOR SOIL CULTIVATION

A.S. Ilintsev^{1, 2✉}, E.N. Nakvasina^{1, 2}, A.P. Bogdanov^{1, 2}, A.A. Paramonov¹

¹Northern Research Institute of Forestry, 13, Nikitova st., 163062, Arkhangelsk, Russia.

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 163002, Arkhangelsk, Russia

a.ilintsev@narfu.ru

The article presents the study materials of forest crops created at spot mounds in the climate conditions of the Dvinsk-Vyhegodsk taiga region. We conducted a field survey of 17 forest-cultivated areas, where we laid quadrats for assessing the quality of forest crops and site preparation. We studied the water-physical properties in the rooting depth at spot mounds and cutting strips where there was no soil cultivation. It has been established that the density of forest crops generally corresponds to the regulatory limits designed in artificial reforestation projects. We have determined the survival rate of forest crops created by planting material with a root-balled and bare root tree system, which varies from 72 to 100 %. The plantations showed the highest survival rate during the first year especially pine crops with a root-balled system, in areas of two- and three-year-old crops, the survival rate is slightly lower, especially when planting bare root spruce seedlings. The results of a correlation analysis are presented, which showed that soil moisture had the greatest effect on the survival of bare root seedlings ($\rho = -0,894$, $p = 0,04$). We have analyzed the relationship between the survival rate of seedlings and the physical properties of the soil in the planting spots. We have compared the properties of the soil in the rooting depth at spot mounds and cutting strips, where no soil cultivation was carried out. It was revealed that the soil bulk density at spot mounds was 8 % higher, and humidity was 11,4 % lower. We have found that this leads to a decrease in the total porosity and an increase in the porosity of aeration in the rooting depth of the soil at spot mounds. It is shown that soil cultivation by creating spot mounds by excavators in the conditions of the North provides sufficiently favorable water-air properties of planting sites for the creation of forest crops with pine and spruce planting material with both ball-root and bare root system.

Keyword: clear cuts, excavator tillage, physical soil properties, forest crops, density, survival rate

Suggested citation: Ilintsev A.S., Nakvasina E.N., Bogdanov A.P., Paramonov A.A. *Опыт создания лесных культур на микроповышениях при экскаваторной обработке почвы* [Forest crops at spot mounds after excavator soil cultivation]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 2, pp. 5–16.

DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-5-16

References


- [1] Simonsen R., Rosvall O., Gong P., Wibe S. Profitability of measures to increase forest growth. *Forest Policy and Economics*, 2010, v. 12, no. 6, pp. 473–482.
- [2] Sikström U., Hjelm K., Hanssen K.H., Saksa T., Wallertz K. Influence of mechanical site preparation on regeneration success of planted conifers in clearcuts Fennoscandia — a review. *Silva Fennica*, 2020, v. 54, no. 2, pp. 1–35. <https://doi.org/10.14214/sf.10172>
- [3] Jansson G., Hansen J.K., Haapanen M., Kvaalen H., Steffenrem A. The genetic and economic gains from forest tree breeding programmes in Scandinavia and Finland. *Scandinavian J. of Forest Research*, 2017, v. 32, no. 4, pp. 273–286.

- [4] Häggström B., Domevcik M., Öhlund J., Nordin A. Survival and growth of Scots pine (*Pinus sylvestris*) seedlings in north Sweden: effects of planting position and arginine phosphate addition. *Scandinavian J. of Forest Research*, 2021, v. 36, no. 6, pp. 423–433. <https://doi.org/10.1080/02827581.2021.1957999>
- [5] Luoranen J., Laine T., Saksä T. Field performance of sand-coated (Conniflex®) Norway spruce seedlings planted in mounds made by continuously advancing moulder and in undisturbed soil. *Forest Ecology and Management*, 2022, v. 517, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120259>
- [6] Ramantswana M., Guerra S.P.S., Ersson B.T. Advances in the mechanization of regenerating plantation forests: a review. *Curr. For. Rep.*, 2020, v. 6, no. 2, pp. 143–158. <https://doi.org/10.1007/s40725-020-00114-7>
- [7] Örlander G., Gemmel P., Hunt J. Site preparation: A Swedish overview (no. 105). BC Ministry of Forests, 1990, 62 p.
- [8] Burton P., Bedford L., Goldstein M., Osberg M. Effects of disk trench orientation and planting spot position on the ten-year performance of lodgepole pine. *New For.*, 2000, v. 20, no. 1, pp. 23–44
- [9] Langvall O., Nilsson U., Örlander G. Frost damage to planted Norway spruce seedlings — influence of site preparation and seedling type. *Forest Ecology and Management*, 2001, v. 141, no. 3, pp. 223–235.
- [10] Örlander G., Hallsby G., Gemmel P., Wilhelmsson C. Inverting improves establishment of *Pinus contorta* and *Picea abies* — 10-year results from a site preparation trial in Northern Sweden. *Scandinavian J. of Forest Research*, 1998, v. 13, no. 1–4, pp. 160–168.
- [11] de Chantal M., Leinonen K., Ilvesniemi H., Westman C.J. Combined effects of site preparation, soil properties, and sowing date on the establishment of *Pinus sylvestris* and *Picea abies* from seeds. *Canadian J. of Forest Research*, 2003, v. 33, no. 5, pp. 931–945.
- [12] Varfolomeev L.A., Sungurov R.V. *Pochvennaya ekologiya lesnykh kul'tur na Severe* [Soil ecology of forest crops in the North]. Arkhangel'sk: Severnyy nauchno-issledovatel'skiy institut lesnogo khozyaystva, 2007, 291 p.
- [13] Sutton R.F. Mounding site preparation: a review of European and north American experience. *New For.*, 1993, v. 7, no. 2, pp. 151–192.
- [14] Grossnickle S.C. Importance of root growth in overcoming planting stress. *New For.*, 2005, v. 30, no. 2–3, pp. 273–294.
- [15] Mochalov B.A. *Podgotovka pochvy i vybor posadochnogo mesta pri sozdanii lesnykh kul'tur sosny iz seyancev s zakrytymi korniyami* [Soil cultivation and selection planting site attached to pine artificial stands creation from containerized seedlings]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2014, no. 4, pp. 9–18.
- [16] Babich N.A., Nabatov N.M. *Lesnye kul'tury* [Forest crops]. Arkhangel'sk: Northern (Arctic) Federal University, 2010, 166 p.
- [17] Malahov P.M. *Lesnye kul'tury* [Forest crops]. Arkhangel'sk: CPI SAFU, 2012, 223 p.
- [18] Hall P. Mechanical site preparation using excavators. *New Zealand Journal of Forestry*, 1995, pp. 31–35.
- [19] Morozov A.E., Baturin S.V. *Effektivnost' lesovosstanovleniya na sploshnykh vyrubkakh posle primeneniya kompleksov mnogooperatsionnykh lesozagotovitel'nykh mashin v usloviyakh Biserskogo lesnichestva Permskogo kraya* [The effectiveness of reforestation in clear cuts after the use of multi-operational logging machines in the conditions of the Bisersky forestry of the Perm Region]. *Les Rossii i khozyaystvo v nikh*, 2020, no. 2 (73), pp. 50–57.
- [20] *Ob utverzhdenii Pravil lesovosstanovleniya, formy, sostava, poryadka soglasovaniya proekta lesovosstanovleniya, osnovaniy dlya otkaza v ego soglasovanii, a takzhe trebovaniy k formatu v elektronnoy forme proekta lesovosstanovleniya: Prikaz Minprirody Rossii ot 29.12.2021 N 1024* [On approval of the Rules of reforestation, form, composition, procedure for approving the reforestation project, grounds for refusal to approve it, as well as requirements for the format in electronic form of the reforestation project: Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation dated 29.12.2021 N 1024]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/728111110> (accessed 01.10.2022).
- [21] Nakvasina E.N., Seryy V.S., Semenov B.A. *Polevoy praktikum po pochvovedeniyu* [Field workshop on soil science]. Arkhangel'sk: Arkhangel'skiy GTU [Arkhangel. State Technical University], 2007, 127 p.
- [22] Nakvasina E.N., Lyubova S.V. *Pochvovedenie* [Soil science]. Arkhangel'sk: SAFU, 2016, 146 p.
- [23] Sklyarov G.A., Sharova A.S. *Pochvy lesov Evropeyskogo Severa* [Forest soils of the European North]. Moscow: Nauka, 1970, 271 p.
- [24] Bondarev A.G. *Fizicheskie svoystva pochv kak teoreticheskaya osnova prognoza ikh uplotneniya* [Physical properties of soils as a theoretical basis for the forecast of their compaction]. *Vliyaniye sel'skokhozyaystvennoy tekhniki na pochvu* [The influence of agricultural machinery on the soil]. Moscow: Nauka, 1981, pp. 80–85.
- [25] Seryy V.S., Anikeeva V.A., Vyalykh N.I., Kubrak N.I. *Izmeneniye lesorastitel'nykh usloviy vyrubok pri sovremennykh lesozagotovkakh* [Changing Forest Site of Cuttings in Modern Logging]. *Ekologicheskie issledovaniya v lesakh Evropeyskogo Severa* [Proceedings of Environmental Studies in the Forests of the European North]. Arkhangel'sk: AILiLKh, 1991, pp. 3–15.
- [26] Sokolovskaya N.A., Revut K.B., Markova I.A., Shevlyakov I.R. *Rol' plotnosti pochv pri lesovosstanovlenii* [The role of soil bulk density in reforestation]. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 1977, no. 2, pp. 44–55.
- [27] Seryy V.S., Vyalykh N.I., Kryukova M.M., Gulaya Z.I. *Lesovodstvennaya otsenka ispol'zovaniya valochno-trelevochnykh mashin LP-49* [Forestry assessment of the use of felling and skidding machines LP-49]. *Materialy otchetnoy sessii po itogam nauchno-issledovatel'skikh rabot za 1989 god* [Materials of the reporting session on the results of research works for 1989]. Arkhangel'sk, 1990, pp. 35–37.
- [28] Shein E.V. *Kurs fiziki pochv* [Course of soil physics]. Moscow: MSU, 2005, 432 p.
- [29] Ilintsev A., Bogdanov A., Nakvasina E., Amosova I., Koptev S., Tretyakov S. The natural recovery of disturbed soil, plant cover and trees after clear-cutting in the Boreal Forests, Russia. *iForest*, 2020, v. 13, pp. 531–540. <https://doi.org/10.3832/ifer3371-013>
- [30] Richards D., Cockroft B. Soil physical properties and root concentrations in an irrigated apple orchard. *Australian J. of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 1974, v. 14, pp. 103–107.
- [31] Page-Dumroese D.S., Harvey A.E., Jurgensen M.F., Amaranthus M.P. Impacts of soil compaction and tree stump removal on soil properties and outplanted seedlings in northern Idaho, USA. *Canadian J. of Forest Research*, 1998, v. 78, pp. 29–34. <https://doi.org/10.4141/S97-022>
- [32] Karpechko A.Yu. *Izmeneniye plotnosti i kornenasyshchennosti pochv pod vliyaniem lesozagotovitel'noy tekhniki v elovykh lesakh yuzhnoy Karelii* [Changes in density and root mass in soils under the influence of harvesting machines in spruce forests of Southern Karelia]. *Lesovedenie* [Russian J. of Forest Science], 2008, no. 5, pp. 66–70.

- [33] Grable A.R., Siemer E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potentials, and elongation of corn roots. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1968, v. 32, pp. 180–186.
- [34] Kozłowski T.T. Soil aeration, flooding and tree growth. *J. of Arboriculture*, 1985, v. 11, pp. 85–96.
- [35] Osman K.T. *Forest Soils: Properties and Management*. Switzerland: Springer Science & Business Media, 2013, 217 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02541-4_2
- [36] Bartenev I.M. *K voprosu sozdaniya lesnykh kul'tur posadkoy PZMK* [On the issue of creating forest crops by planting PZMC]. *Lesotekhnicheskii zhurnal*, 2013, no. 2, pp. 123–130.
- [37] Mochalov B.A., Sen'kov A.O. *Rost seyantsev sosny s zakrytymi i otkrytymi kornyami v kul'turakh taezhnoy zony* [Growth of bare-root and containerized pine seedlings in cultures of taiga zone]. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*, 2007, no. 4, pp. 145–147.
- [38] L'vov P.N., Ipatov L.F., Klinov R.N., Nakvasina E.N. *Planirovanie i organizatsiya rabot po estestvennomu i iskusstvennomu lesovosstanovleniyu v zone taygi: tekhnicheskie ukazaniya* [Planning and organization of works on natural and artificial reforestation in the taiga zone: technical instructions]. Arkhangelsk: RIO ALTI, 1986, 36 p.
- [39] Gladinov A.N., Konovalova E.V., Sodboeva S.Ch. *Sravnitel'nye rezul'taty ispol'zovaniya seyantsev sosny obyknovennoy s otkrytoy i zakrytoy kornevoy sistemoy pri iskusstvennom lesovosstanovlenii v usloviyakh Zapadnogo Zabaykal'ya* [Results of a comparative analysis of the use of scottal pine seedlings with open and closed root system under artificial forest recovery in the conditions of western transbaikalie]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2021, no. 11, pp. 7–12.
- [40] Nzokou P., Cregg B.M. Morphology and foliar chemistry of containerized *Abies fraseri* (Pursh) Poir. seedlings as affected by water availability and nutrition. *Annals of Forest Science*, 2010, v. 67, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1051/forest/2010015>

The work was carried out within the framework of the state assignment of FBU «SevNIILKh» for conducting applied scientific research (№ 122020100319-9).

Authors' information

Ilintsev Aleksey Sergeevich  — Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher of the Northern Research Institute of Forestry; Associate Professor of the Department of Forestry and Forest Management of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, a.ilintsev@narfu.ru

Nakvasina Elena Nikolaevna — Dr. Sci. (Agriculture), Professor of the Department of Forestry and Forest Management of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov; Leading Researcher of the Northern Research Institute of Forestry, nakvasina@yandex.ru

Bogdanov Aleksandr Petrovich — Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher of the Northern Research Institute of Forestry; Associate Professor of the Department of Forestry and Forest Management of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, aleksandr_bogd@mail.ru

Paramonov Andrey Alekseevich — Cand. Sci. (Agriculture), Researcher of the Northern Research Institute of Forestry, a.paramonov@sevniilh-arh.ru

Received 30.03.2023.

Approved after review 08.11.2023.

Accepted for publication 06.02.2024.

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

ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО ФОТОЛЮМИНОФОРМ АГРОТЕКСТИЛЯ СПАНБОНД НА УКОРЕНЕНИЕ ЧЕРЕНКОВ ТУИ ЗАПАДНОЙ (*THUJA OCCIDENTALIS* L.)

Н.Н. Бессчетнова¹, В.П. Бессчетнов^{1✉}, Р.Н. Храмов²

¹ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный агротехнологический университет», Россия, 603107, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 97

²ФГБУН «Институт теоретической и экспериментальной биофизики Российской академии наук», Россия, 142290, Московская обл., г. Пушкино, ул. Институтская, д. 3

lesfak@bk.ru

Исследовано влияние светотрансформирующих добавок, интегрированных в укрывные материалы вегетационных сооружений, при укоренении физиологически активных черенков туи западной (*Thuja occidentalis* L.). Испытаны два типа укрывных материалов на основе сетчатого нетканого термоскрепленного полипропиленового полотна: с включением светотрансформирующих добавок и без таковых. Фотолюминофором являлся оксисульфид иттрия, легированный европием ($Y_2O_3:SeU$). Обеспечено соблюдение принципа единственного логического различия, а также базовых требований к постановке опыта. Реализован полевой стационарный опыт с фиксацией морфометрических параметров корневых систем черенков. Установлено усиление регенерационной способности черенков под действием светотрансформирующих укрытий. Обнаружено увеличение показателей корнеобразовательного процесса по средней и суммарной длине придаточных корней, сформированных на регенерировавших черенках. Зафиксировано увеличение анализируемых показателей при использовании в качестве укрывного материала светотрансформирующего волокна во всех повторностях опыта. Обнаружено весьма заметное превышение средней длины корней и их средней суммарной длины по вариантам опыта (типам укрытий): *Thuja occidentalis* f. 'Brabant' — в 2,69 и 2,70 раза; *Thuja occidentalis* f. 'Tiny Tim' — в 1,83 и 3,02 раза; *Thuja occidentalis* f. 'Golden Smaragd' — в 2,26 и 9,17 раза. Подтверждена существенность зафиксированных различий результатами однофакторного дисперсионного анализа. Обнаружено достоверное влияние различий в типах укрытия, которое составило $11,43 \pm 0,90$ % (по методу Плохинского) и $18,93 \pm 0,83$ % (по алгоритму Снедекора). Доказана эффективность применения светотрансформирующего укрывного материала при укоренении черенков различных декоративных форм туи западной.

Ключевые слова: туя западная, черенки, укоренение, теплицы, светотрансформирующие материалы, фотолюминофор, регенерационная способность, корнеобразование

Ссылка для цитирования: Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П., Храмов Р.Н. Влияние модифицированного фотолюминофором агротекстиля спанбонд на укоренение черенков туи западной (*Thuja occidentalis* L.) // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 2. С. 17–26. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-17-26

Модернизация и последовательный переход к непрерывному и неистощительному лесопользованию заложены в качестве ключевых моментов в Стратегию развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 г. Повышение эффективности применяемых в отрасли технологий требует реализации инновационного подхода к организации производства всех форм и видов продукции, в том числе к выращиванию посадочного материала древесных растений. Интенсификация данного процесса базируется на широком использовании тепличных комплексов, где активно применяются различные типы полимерных покрытий вегетационных сооружений. Результативность деятельности таких хозяйств во многом определяется техническими свойствами и оптическими характеристиками этих покрытий [1–3]. Включение в их состав светопреобразую-

щих и светокорректирующих материалов (фотолюминофоров) позволяет регулировать спектральные и другие параметры светового потока в количественном и качественном отношении [4–10]. Зафиксирован положительный эффект применения светотрансформирующих материалов, используемых при укоренении черенков различных, в частности древесных и кустарниковых растений [1, 11]. Условия освещенности вызывают адаптивные реакции растений, проявляющиеся в изменении пигментного состава их фотосинтезирующего аппарата [10, 12–14]. Дополнительный свет оказывает положительное влияние на фотосинтез и продуктивность растений, вызывая интенсивное развитие корневых систем [10, 15–17]. Перспективным направлением в применении данных технологий выступает их адаптация к схемам вегетативного размножения древесных и кустарниковых пород. Интерес представляет туя западная (*Thuja occidentalis* L.),

декоративные формы и сорта которой, обладая различиями в пигментном составе хвои и регенерационной способности черенков, находят широкое применение [18–20]. Однако детальных исследований по влиянию люминофоров на рост и развитие корневой системы древесных растений пока еще крайне мало, а публикации по данной тематике ограничены.

Цель работы

Цель работы — выявление влияния качества света на регенерационную способность корней физиологически активных черенков декоративных форм туи западной (*Thuja occidentalis* L.), выращиваемых под нетканым материалом спанбонд, содержащим неорганический фотолуминофор.

Материалы и методы

Объектом исследования служили черенки декоративных форм туи западной, находящиеся на момент заготовки в состоянии активной вегетации. Их возраст составил 3 года при оценке по нижнему срезу черенка. Влияние различий в параметрах черенков исключалось благодаря тому, что помимо выравнивания их размерных и общебиологических характеристик по вариантам и повторностям опыта, учитываемыми признаками в нем выступали параметры корневых систем. В этом отношении все черенки абсолютно тождественны — на момент начала наблюдений не имели корней, обладали нулевыми стартовыми количественными характеристиками (длиной, диаметром, количеством боковых ответвлений и пр.), а значит, были идентичными. Этого практически невозможно добиться для их надземной части. Она, невзирая на предварительное выравнивание линейных параметров, неизбежно сохраняла возникающие по естественным причинам индивидуальные различия по высоте, диаметру, массе, количеству боковых побегов и метамеров на них, состоянию и степени развитости ксилемы, содержанию в тканях запасных питательных веществ и пигментов и пр.

Элиминация влияния различий в условиях среды в вегетационных сооружениях обеспечивалась предельной гомогенизацией субстрата (песок слоем 25 см), однотипностью дренажного основания (щебень слоем 30 см), одинаковыми схемами размещения черенков (5×7 см) и глубиной их посадки (3 см), выравниванием характеристик внешней освещенности, случайным порядком размещения вариантов и многократной повторностью. Проведение работ и формирование выборок осуществлено в соответствии с общепринятыми методическими рекомендациями [21–23].

В качестве повторностей опыта привлечены три декоративные формы туи западной,

получившие обозначения: 1) колоновидная (*Thuja occidentalis* f. 'Brabant'); 2) шаровидная (*Thuja occidentalis* f. 'Tiny Tim'); 3) золотистая (*Thuja occidentalis* f. 'Golden Smaragd').

Выбор обусловлен неодинаковой регенерационной способностью их черенков и различным составом пигментов хвои, участвующих в фотосинтезе. В частности, повторность колоновидная характеризуется сравнительно высоким уровнем укореняемости черенков, шаровидная — укореняется хуже, золотистая — при наиболее затрудненном укоренении отличается пониженным содержанием в хвое хлорофиллов и повышенным содержанием каротиноидов. Содержание и соотношение разных форм хлорофилла и каротиноидов в листовом аппарате традиционно служит информативным признаком сравнительной оценки древесных видов [24, 25]. Количество черенков в каждом варианте и повторности опыта указано в табл. 1.

Испытания проведены по двум типам укрывных материалов, которые выступали вариантами (факторами) опыта. Первый тип (вариант 1) — модифицированный спанбонд с плотностью 30 г/м², с интегрированными в его структуру наночастицами фотолуминофора — оксисульфидом иттрия, легированного европием (Y₂O₂SEu). Детальная характеристика представлена в отечественных публикациях [5]. В таких материалах объединены достоинства обычного агротекстиля с преимуществами укрывных светотрансформирующих пленок [4–10, 16, 17, 26]. Второй тип (вариант 2) — обычный (без люминофора) белый спанбонд (контроль) с той же плотностью. Статистический и дисперсионный анализы выполнены с учетом существующих методических разработок [21–23, 27, 28].

Результаты и обсуждение

Установлены заметные различия в реализации регенерационной способности черенков под светотрансформирующими и обычными укрытиями, оцениваемой по средней и суммарной длине образовавшихся адвентивных корней (табл. 1). Во всех рассматриваемых случаях сравнения светотрансформирующее укрытие усилило корнеобразование на черенках и увеличило среднюю длину их корней. Превышение по среднему показателю составило: по повторности колоновидная — 1,252 раза; шаровидная — 1,829 раза; по форме золотистая — 2,263 раза.

Был выявлен характер влияния различного содержания пигментов в трех повторностях туи на их способность к регенерации придаточных корней. Обращает на себя внимание тот факт, что реакция туи западной золотистой, у которой ослаблена пигментация хвои хлорофиллами при пре-

Т а б л и ц а 1

**Длина придаточных корней на черенках трех форм туи западной
в зависимости от вариантов укрывного материала**
**The length of the adventitious roots on the cuttings of three forms of Northern white-cedar,
depending on the variants of the covering material**

| Параметр | Колоновидная | | Шаровидная | | Золотистая | |
|--------------------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|
| | Люминофор | Белый спанбонд | Люминофор | Белый спанбонд | Люминофор | Белый спанбонд |
| Количество черенков, шт. | 377 | 229 | 36 | 28 | 144 | 44 |
| Длина, см: | | | | | | |
| mid | 3,20 ± 0,146 | 2,56 ± 0,171 | 2,04 ± 0,270 | 1,12 ± 0,211 | 2,21 ± 0,197 | 0,98 ± 0,191 |
| min | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| max | 13,5 | 12,5 | 6,5 | 5,5 | 10,5 | 5,0 |
| Коэффициент вариации, % | 88,32 | 101,17 | 79,31 | 100,00 | 107,09 | 129,96 |
| Точность опыта, % | 4,55 | 6,69 | 13,22 | 18,90 | 8,92 | 19,59 |

Т а б л и ц а 2

**Существенность различий в средней длине адвентивных корней
на черенках трех форм туи западной**
**The significance of differences in the average length of adventitious roots on cuttings
of three forms of northern white-cedar**

| Показатель | Колоновидная | Шаровидная | Золотистая |
|---|--------------|------------|------------|
| Критерий Фишера: | | | |
| опытное значение (F_{on}) | 7,41 | 6,67 | 22,34 |
| табличное значение (F_{05}/F_{01}) | 3,85/6,64 | 3,99/7,04 | 3,90/6,79 |
| Доля влияния различий в укрывных материалах (организованный фактор h^2): | | | |
| по Плохинскому | 0,0122 | 0,0971 | 0,0814 |
| по Снедекору | 0,0221 | 0,1525 | 0,1779 |
| Ошибка доли влияния фактора ($\pm s_n^2$): | | | |
| по Плохинскому | 0,0016 | 0,0146 | 0,0036 |
| по Снедекору | 0,0016 | 0,0137 | 0,0033 |
| Наименьшая существенная разность на 5%-м уровне значимости (HCP_{05}) | 0,452 | 0,703 | 0,557 |
| Критерий Тьюки на 5%-м уровне значимости (D_{05}) | 0,456 | 0,711 | 0,562 |

обладании каротиноидов, показала наивысшую чувствительность и более выраженную реакцию на коррекцию светового потока светотрансформирующим укрывным материалом.

Указанные различия между сравниваемыми вариантами укрывного материала оказались существенными, что подтвердил однофакторный дисперсионный анализ по длине адвентивных корней на черенках (табл. 2). В ходе этого анализа на трех формах туи было испытано два варианта укрывного материала — содержащий люминофор и белый спанбонд без него. Тестируемым признаком регенерационной способности служила длина корней. Во всех повторностях опыта установлено наличие существенных различий (см. табл. 2) между применяемыми вариантами укрывных материалов, что подтверждает действительность влияния светотрансформирующего материала на регенерационную способность черенков и темпы их пострегенерационного развития.

Расчетные величины критерия Фишера превосходят соответствующие значения на 1%-м и на 5%-м уровнях значимости. В частности, на 5%-м уровне значимости такое превышение составило от 1,74 раза (по шаровидной форме) до 5,82 раза (по золотистой форме). Эффективность действия организованного фактора (различия в оптических свойствах укрывного материала) при подтвержденной достоверности вместе с тем оказалась невысокой: от $1,22 \pm 0,16$ % (по колоновидной) до $9,71 \pm 1,46$ % (по шаровидной).

Помимо анализа, выполненного по средней длине придаточных корней сравнение вариантов укрывного материала с различными оптическими свойствами проведено по их суммарной длине на отдельном черенке (табл. 3). В данном случае также наблюдалось положительное влияние светотрансформирующего укрывного материала. Все повторности опыта (см. табл. 3) продемонстрировали значительное превышение анализируемых показателей при использовании в качестве

Т а б л и ц а 3

**Суммарная длина придаточных корней трех форм туи западной
в зависимости от укрывного материала**

The total length adventitious roots of the three forms of Northern white-cedar, depending on the covering material

| Укрывной материал (варианты опыта) | Колоновидная | | Шаровидная | | Золотистая | |
|---------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| | Общая суммарная длина, см | Средняя суммарная длина, см | Общая суммарная длина, см | Средняя суммарная длина, см | Общая суммарная длина, см | Средняя суммарная длина, см |
| Обычный спанбонд | 586,10 | 17,24 | 31,30 | 3,48 | 45,00 | 1,96 |
| Санбонд с люминофором | 1207,80 | 46,45 | 73,60 | 10,51 | 376,60 | 17,93 |

Т а б л и ц а 4

**Существенность различий по суммарной длине адвентивных корней
на черенках трех форм туи западной**

The significance of differences in the total length of adventitious roots on cuttings of three forms of Northern white-cedar

| Показатель | Колоновидная | Шаровидная | Золотистая |
|---|---------------------|--------------------|--------------------|
| Критерий Фишера: опытное значение (F_{on}) табличное значение (F_{05}/F_{01}) | 16,915 3,85/6,64 | 2,139 3,99/7,04 | 9,855 3,90/6,79 |
| Доля влияния различий в укрывных материалах (организованный фактор h^2): по Плохинскому по Снедекору | 0,2258 0,3507 | 0,1325 0,1264 | 0,1865 0,2825 |
| Ошибка доли влияния фактора ($\pm s_h^2$): по Плохинскому по Снедекору | 0,0133 0,0112 | 0,0620 0,0624 | 0,0189 0,0167 |
| Наименьшая существенная разность на 5%-м уровне значимости (HCP_{05}) | 14,083 | 10,248 | 9,707 |
| Критерий Тьюки на 5%-м уровне значимости (D_{05}) | 14,083 | 10,206 | 9,904 |

укрывного материала свето-трансформирующего волокна. Превышение общей и средней суммарной длины по вариантам опыта было весьма заметным и соответственно составило: колоновидная — в 2,06 и 2,70 раза; шаровидная — в 2,35 и 3,02 раза; золотистая — в 8,37 и 9,17 раза.

Суммарная длина адвентивных корней, образованных на одном черенке, на котором зафиксирована регенерация, служит вполне надежным критерием косвенной оценки регенерационной активности и общей биопродуктивности — способности формировать большую массу новообразований в процессе регенерации. Это тесно связано и с повышением интенсивности фотосинтеза зеленых черенков древесных растений, находящихся в активной физиологической фазе. Эти различия также оказались существенными (табл. 4).

В рассматриваемом анализе эффективность действия организованных факторов (в данном дисперсионном анализе организованным фактором является различие в типах укрывного материала) оказалась принципиально больше (см. табл. 4), чем в предыдущем случае дисперсионного анализа (см. табл. 2). У форм туи западной с подтвержденным фактом на-

личия существенных различий между вариантами опыта эффективность достигала значений: $22,58 \pm 1,33$ % (колоновидная) и $18,65 \pm 1,89$ % (золотистая). Полученные данные служат надежным подтверждением результативности применения в качестве укрывного материала синтетического волокна со светотрансформирующими добавками. Оценить эффективность влияния каждого из учитываемых в опыте факторов (биологические различия между декоративными формами туи и различия в светорегулирующих свойствах укрывного материала) позволил двухфакторный анализ (табл. 5).

В табл. 5 представлены оценки влияния рассматриваемых в данном дисперсионном анализе факторов: А — организованный фактор, действие которого связано с различиями в типах укрывных материалов; В — организованный фактор, действие которого связано с различиями между повторностями опыта (принадлежность к сорту/форме туи западной); АВ — эффект взаимодействия организованных факторов А и В; Z — неорганизованный фактор или остаточная дисперсия, соответствующая внутригрупповой изменчивости, индуцируемой пестротой фона не учитываемых в опыте факторов среды.

**Двухфакторный дисперсионный анализ по суммарной длине адвентивных корней
на одном черенке трех форм туи западной**

**Two-factor analysis of variance based on the total length of adventitious roots on one cutting
of three forms of Northern white-cedar**

| Показатель | Факторы влияния | | | |
|---|------------------------------|-------------------------------|--|---------------------------------|
| | Укрывной материал (фактор А) | Форма туи западной (фактор В) | Взаимодействие материала и формы туи (фактор АВ) | Остаточная дисперсия (фактор Z) |
| Критерий Фишера: опытное значение ($F_{оп}$) табличное значение на 5%-м уровне значимости (F_{05}) | 16,50 3,94 | 12,69 3,09 | 2,20 3,09 | – – |
| Доля влияния фактора на формирование общей дисперсии (h^2): по Плохинскому по Снедекору | 0,1143 0,1893 | 0,1759 0,2142 | 0,0305 – | 0,6792 0,5965 |
| Ошибка доли влияния фактора ($\pm s_n^2$): по Плохинскому по Снедекору | 0,0090 0,0083 | 0,0168 0,0160 | 0,0198 – | 0,3208 0,4035 |

За исключением одного случая (форма шаровидная), существенность достигнутых различий в проявлении регенерационной способности черенков, выразившейся в образовании определенного количества придаточных корней, оцениваемого по их суммарной длине, получила подтверждение. Влияние каждого из независимых организованных факторов в отдельности — укрывной материал (фактор А) и форма туи (фактор В) — вызвало возникновение существенных различий в дисперсионном комплексе. Об этом свидетельствуют опытные значения критерия Фишера, которые были заметно больше соответствующих табличных значений на 5%-м уровне значимости. Однако их взаимодействие — фактор АВ — не дало эффекта существенности различий между анализируемыми образцами. Это указывает на отсутствие выраженной специфичности в реакции различных декоративных форм туи на использование укрывного материала с люминофором. Влияние различий в типах укрытия достоверно и составило $11,43 \pm 0,90$ % (по методу Плохинского) и $18,93 \pm 0,83$ % (по алгоритму Снедекора). Доля влияния различий в происхождении растений (принадлежность к форме) была несколько больше: $17,59 \pm 1,68$ % (по методу Плохинского) и $21,42 \pm 1,60$ % (по алгоритму Снедекора). Отчетливо прослеживается доминирующее влияние фоновой пестроты условий среды в вегетационных сооружениях на формирование общей дисперсии (фактор Z). На долю фактора Z, соответственно, приходится 67,92 % и 32,08 % учитываемых в опыте различий, что можно объяснить высокой чувствительностью испытываемых растений к влиянию внешних фоновых факторов.

В порядке обсуждения можно отметить, что на сегодняшний день трудно объяснить биологиче-

ские механизмы действия светопреобразующего спанбонда, благодаря которым получены такие значимые эффекты стимуляции в укоренении черенков туи, так же, как и в пионерской работе [5] рост биомассы салата и капусты. Согласно неопубликованным данным, аналогичные светопреобразующие покрытия могут увеличить урожай клубней семенного картофеля до 2,5 раза. Результаты 2-летних полевых опытов [29, 30] показали, что солнечный свет, трансформированный полимерной светопреобразующей пленкой, увеличивает в сотни раз численность микроорганизмов в нефтезагрязненной почве, что в разы стимулирует активность ферментов и процессов метаболизма и повышает скорость деградации нефтезагрязнений до 4 раз. Также отмечено [31], что применение микробиологических препаратов при выращивании картофеля позволяет получать прибавку к урожаю до 90 %. На этом основании можно предположить, что наиболее вероятным механизмом таких эффектов в развитии корневой системы туи является светостимуляция эндо- и экзосферной микробиоты растений, однако данная гипотеза требует специальных доказательств.

Выводы

1. Применение светотрансформирующего укрывного материала при укоренении физиологически активных черенков различных декоративных форм (сортов) туи западной вызывает повышение регенерационной способности и дает положительный эффект по количеству образованных на них придаточных корней, их средней и суммарной длине.

2. Усиление роста придаточных корней при использовании фото-регулирующего укрытия зафиксировано во всех вариантах опыта по всем

учитываемым показателям, что свидетельствует об общем положительном эффекте реализации рассматриваемой технологии и возможности широкого применения ее в производстве посадочного материала вегетативного происхождения декоративных форм древесных растений.

3. Наиболее чувствительной к воздействию фоторегулирования спектрального состава солнечного света в вегетационных сооружениях, используемых при укоренении черенков, оказалась золотистая форма — ‘Голден’, которая характеризуется пониженным содержанием хлорофиллов и повышенным содержанием каротиноидов. Косвенно это может служить свидетельством такого изменения спектрального состава солнечного светового излучения, вызванного фотолюминофорными добавками, при котором из числа участвующих в фотосинтезе пластидных пигментов в большей степени повышается активность каротиноидов.

Благодарности

Авторы выражают благодарность доктору биологических наук В.Д. Креславскому за научное обсуждение результатов, использованное при написании статьи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (номер государственного задания 075-01025-23-01).

Список литературы

- [1] Edser C. Light manipulating additives extend opportunities for agricultural plastic films // *Plastics, Additives and Compounding*, 2002, v. 4, no. 3, pp. 20–24. DOI: 10.1016/S1464-391X(02)80079-4
- [2] Brown R.P. Polymers in agriculture and horticulture // *Rapra Review Reports*, 2004, v. 15, no. 2, pp. 1–103.
- [3] Max J.F.J., Schurr U., Tantau H.-J., Mutwiwa U.N., Hofmann T., Ulbrich A. Greenhouse Cover Technology // *Horticultural Reviews*, 2012, v. 40, (Horticultural Reviews; Book 108), pp. 259–396.
- [4] Иваницкий А.Е., Райда В.С., Минич А.С., Ивлев Г.А. Исследование свойств фотолюминесцентных пленок при возбуждении солнечным излучением // *Вестник Томского государственного педагогического университета*, 2011. Вып. 8(110). С. 119–123.
- [5] Khramov R.N., Kreslavski V.D., Svidchenko E.A., Surin N.M., Kosobryukhov A.A. Influence of photoluminophore-modified agro textile spunbond on growth and photosynthesis of cabbage and lettuce plants // *Optics Express*, 2019, v. 27, no. 22, pp. 31967–31977. DOI: 10.1364/OE.27.031967
- [6] Brown C.S., Schuerger A.C., Sager J.C. Growth and photomorphogenesis of pepper plants under red light-emitting-diodes with supplemental blue or far-red lighting // *J. of the American Society for Horticultural Science*, 1995, v. 120, no. 5, pp. 808–813. DOI: 10.21273/JASHS.120.5.808
- [7] González A., Rodríguez R., Bañón S. J.A., Franco, Fernández J.A. The influence of photosensitive plastic films as greenhouse cover on sweet pepper yield and on insect pest levels // *Acta Horticulturae*, 2001, v. 559, pp. 233–238. DOI:10.17660/ActaHortic.2001.559.34
- [8] Espi E., Salmeron A., Fontecha A., García Y., Real A.I. Plastic films for agricultural applications // *J. of Plastic Film and Sheeting*, 2006, v. 22, no. 2, pp. 85–122. DOI: 10.1177/8756087906064220
- [9] Espi E., Salmeron A., Fontecha A., García Y., Real A.I. New Ultrathermic Films for Greenhouse Covers // *J. of Plastic Film and Sheeting*, 2006, v. 22, no. 1, pp. 59–68. DOI: 10.1177/8756087906062764
- [10] Kosobryukhov A.A., Kreslavski D., Khramov R.N., Bratkova L.R., Shchelokov R.N. Effect of additional low intensity luminescence Radiation 625 nm on plant growth and photosynthesis // *Biotronics*, 2000, v. 29, pp. 23–31.
- [11] Карасев В.Е. Полисветаны — полимерные светотрансформирующие материалы для сельского хозяйства // *Вестник Дальневосточного отделения РАН*, 1995. № 2. С. 66–73.
- [12] Smith J.L., Burritt D.J., Bannister P. Shoot Dry Weight, Chlorophyll and UV-B-absorbing Compounds as Indicators of a Plant’s Sensitivity to UV-B Radiation // *Annals of Botany*, 2000, v. 86, no. 6, pp. 1057–1063. DOI:10.1006/anbo.2000.1270
- [13] Jansen M.A.K. Ultraviolet-B radiation effects on plants: induction of morphogenic responses // *Physiologia Plantarum*, 2002, v. 116, no. 3, pp. 423–429. DOI: 10.1034/j.1399-3054.2002.1160319.x
- [14] Delprato M.L., Krapp A.R., Carrillo N. Green Light to Plant Responses to Pathogens: The Role of Chloroplast Light-Dependent Signaling in Biotic Stress // *Photochemistry and Photobiology*, 2015, v. 91, no. 5, pp. 1004–1011. DOI: 10.1111/php.12466
- [15] Щелоков Р.Н. Полисветаны и полисветановый эффект // *Известия АН СССР*, 1986. № 10. С. 50–55.
- [16] Минич А.С., Минич И.Б., Зеленьчукова Н.С., Карначук Р.А., Головацкая И.Ф., Ефимова М.В., Райда В.С. Роль красного люминесцентного излучения низкой интенсивности в регуляции морфогенеза и гормонального баланса *Arabidopsis thaliana* // *Физиология растений*, 2006. Т. 53, № 6. С. 762–767.
- [17] De Salvador F.R., Scarascia Mugnozza G., Vox G., Schettini E., Mastroilli M., BouJaoudé M. Innovative photosensitive and photoluminescent plastic films for protected cultivation // *Acta Horticulturae*, 2008, v. 801(801), pp. 115–122. DOI:10.17660/actahortic.2008.801.7
- [18] Котынова М.Ю., Бессчетнов В.П. Регенерационная способность представителей рода туя при укоренении черенков в теплицах // *Современное лесное хозяйство — проблемы и перспективы: Материалы Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию «ВНИИЛГИСБиотех», г. Воронеж, 3–4 декабря 2020 г. Ч–1. Воронеж: Истоки, 2020. С. 40–44.*
- [19] Котынова М.Ю., Бессчетнов В.П., Бессчетнова Н.Н. Укоренение черенков декоративных форм туи западной (*Thuja Occidentalis* L.) в теплицах // *Актуальные проблемы развития лесного комплекса: Матер. XVIII Межд. науч.-тех. конф.: г. Вологда, 1 декабря 2020 г. / Отв. ред. С.М. Хамитова. Вологда: ВоГУ, 2020. С. 147–149.*
- [20] Pedlar J.H., McKenney D.W., Allen D., Lawrence K., Lawrence G., Campbell K. A street tree survey for Canadian communities: Protocol and early results // *The Forestry Chronicle*, 2013, v. 89 (6), pp. 753–758. DOI 10.5558/tfc2013-137

- [21] Mason R.L., Gunst R.F., Hess J.L. *Statistical Design and Analysis of Experiments: With Applications to Engineering and Science*. Hoboken, New Jersey (Printed in the USA): Wiley-Interscience, Wiley Series in Probability and Statistics, 2003, 752 p.
- [22] Srinagesh K. *The Principles of Experimental Research*. Waltham, Massachusetts (United States): Butterworth-Heinemann, 2005, 432 p.
- [23] Dean A. Voss D., Draguljić D. *Design and Analysis of Experiments* (Springer Texts in Statistics), Kindle Edition. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag GmbH, 2017, 865 p.
- [24] Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П., Котынова М.Ю. Сезонный характер содержания пигментов в хвое туи западной в условиях Нижегородской области // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства, 2022. № 3. С. 38–58. DOI 10.21178/2079–6080.2022.3.3
- [25] Houpis J.L.J., Surano K.A., Cowles S., Shinn J.H. Chlorophyll and carotenoid concentrations in two varieties of *Pinus ponderosa* seedlings subjected to long-term elevated carbon dioxide // *Tree Physiology*, 1988, v. 4, no. 2, pp. 187–193. DOI: 10.1093/treephys/4.2.187
- [26] Max J.F.J., Schurr U., Tantau H.-J., Mutwiwa U.N., Hofmann T., Ulbrich A. *Greenhouse Cover Technology* // *Horticultural Reviews*, 2012, v. 40, (Horticultural Reviews; Book 108), pp. 259–396.
- [27] Mead R., Curnow R.N., Hasted A.M. *Statistical Methods in Agriculture and Experimental Biology*. New York: Chapman and Hall/CRC, 2003, 488 p.
- [28] Zar J.H. *Biostatistical Analysis: Fifth Edition*. Edinburg Gate: Pearson New International edition — Pearson Education Limited, 2014, 756 p.
- [29] Филатов Д.А., Иванов А.А., Сваровская Л.И., Юдина Н.В. Влияние светокорректирующей пленки и гуминовых кислот на биохимическое окисление нефти в почве // *Агрохимия*, 2011. № 10. С. 76–82.
- [30] Филатов Д.А., Иванов А.А., Сваровская Л.И., Юдина Н.В. Активация биохимических процессов в нефтезагрязненной почве с применением светокорректирующей пленки и гуминовых кислот // *Почвоведение*, 2011. № 2, С. 226–232
- [31] Жевора С.В., Федотова Л.С., Тимошина Н.А., Князева Е.В., Шабанов А.Э. Биологическая активность почвы, урожайность и качество картофеля в зависимости от использования микробиологических препаратов // *Российская сельскохозяйственная наука*, 2019. № 4. С. 31–35. DOI: 10.31857/S2500-26272019431-35

Сведения об авторах

Бессчетнова Наталья Николаевна — д-р с.-х. наук, доцент, декан факультета лесного хозяйства, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный агротехнологический университет», besschetnova1966@mail.ru

Бессчетнов Владимир Петрович — д-р биол. наук, профессор, зав. кафедрой лесных культур, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный агротехнологический университет», lesfak@bk.ru

Храмов Роберт Николаевич — канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., ФГБУН «Институт теоретической и экспериментальной биофизики Российской академии наук», khramov30@mail.ru

Поступила в редакцию 21.08.2023.

Одобрено после рецензирования 20.12.2023.

Принята к публикации 06.02.2024.

EFFECT OF SPUNBOND AGROTEXTILE MODIFIED WITH PHOTOLUMINOPHORE ON ROOTING OF NORTHERN WHITE CEDAR (*THUJA OCCIDENTALIS* L.) CUTTINGS

N.N. Besschetnova¹, V.P. Besschetnov^{1✉}, R.N. Khramov²

¹Nizhegorodsky State Agrotechnological University, 97, Gagarin av., 603107, Nizhny Novgorod, Russia

²Institute of Theoretical and Experimental Biophysics of the Russian Academy of Sciences, 3, Institutskaya st., 142290, Pushchino, Moscow reg., Russia

lesfak@bk.ru

The effect of light-transforming additives integrated into the covering materials of vegetation structures during the rooting of physiologically active cuttings of Northern white-cedar (*Thuja occidentalis* L.) was investigated. Two types of covering materials based on a mesh nonwoven thermally bonded polypropylene fabric were tested: with the inclusion of light-transforming additives and without them. A covering material was used with a photoluminophore introduced into its composition, which is yttrium oxysulfide doped with europium (Y₂O₃SEu). The principle of the only logical difference is observed, as well as the basic requirements for the formulation of experience. A field stationary experiment was implemented with the fixation of morphometric parameters of root systems of cuttings. The strengthening of the regenerative ability of cuttings under the action of light-transforming shelters has been established. An increase in the indicators of the root-forming process was found in the average and total length of the adventitious roots formed on regenerated cuttings. A significant excess of the analyzed indicators was recorded when using a light-transforming fiber as a covering material in all repetitions of the experiment (forms and varieties). The excess of the average length of the roots and their average total length according to the variants of the experiment (types of shelters) was very noticeable and, accordingly, amounted to: *Thuja occidentalis* f. 'Brabant' — 2,69 and 2,70 times; *Thuja occidentalis* f. 'Tiny Tim' — 1,83 and 3,02 times; *Thuja occidentalis* f. 'Golden Smaragd' — 2,26 and 9,17 times. The significance of the recorded differences was confirmed by the results of one-factor analysis of variance. A significant effect of differences in the types of shelter was found, which amounted to 11,43 ± 0,90 % (according to the Plokhinsky method) and 18,93 ± 0,83 % (according to the Snedekor algorithm). The positive effect of a light-transforming covering material for rooting cuttings of various decorative forms of Northern white-cedar was proved.

Keywords: northern white-cedar, cuttings, rooting, greenhouses, light-transforming materials, photoluminophore, regenerative ability, root formation

Suggested citation: Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Khramov R.N. *Vliyanie modifitsirovannogo fotolyuminoformom agrotekstilya spanbond na ukorenenie cherenkov tui zapadnoy (Thuja occidentalis L.)* [Effect of spunbond agrotexile modified with photoluminophore on rooting of Northern white cedar (*Thuja occidentalis* L.) cuttings]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 2, pp. 17–26. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-17-26

References

- [1] Edser C. Light manipulating additives extend opportunities for agricultural plastic films. *Plastics, Additives and Compounding*, 2002, v. 4, no. 3, pp. 20–24. DOI: 10.1016/S1464-391X(02)80079-4
- [2] Brown R.P. Polymers in agriculture and horticulture. *Rapra Review Reports*, 2004, v. 15, no. 2, pp. 1–103.
- [3] Max J.F.J., Schurr U., Tantau H.-J., Mutwiwa U.N., Hofmann T., Ulbrich A. *Greenhouse Cover Technology*. Horticultural Reviews, 2012, v. 40, (Horticultural Reviews; Book 108), pp. 259–396.
- [4] Ivanitskiy A.E., Rayda V.S., Minich A.S., Ivlev G.A. *Issledovanie svoystv fotolyuminescentnykh plenok pri vozvuzhdenii solnechnym izlucheniem* [Investigation of the properties of photoluminescent films when excited by solar radiation]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta* [Tomsk State Pedagogical University Bulletin], 2011, v. 8 (110), pp. 119–123.
- [5] Khramov R.N., Kreslavski V.D., Svidchenko E.A., Surin N.M., Kosobryukhov A.A. Influence of photoluminophore-modified agro textile spunbond on growth and photosynthesis of cabbage and lettuce plants. *Optics Express*, 2019, v. 27, no. 22, pp. 31967–31977. DOI: 10.1364/OE.27.031967
- [6] Brown C.S., Schuerg A.C., Sager J.C. Growth and photomorphogenesis of pepper plants under red light-emitting-diodes with supplemental blue or far-red lighting. *J. of the American Society for Horticultural Science*, 1995, v. 120, no. 5, pp. 808–813. DOI: 10.21273/JASHS.120.5.808
- [7] González A., Rodríguez R., Bañón S. J.A., Franco, Fernández J.A. The influence of photosensitive plastic films as greenhouse cover on sweet pepper yield and on insect pest levels. *Acta Horticulturae*, 2001, v. 559, pp. 233–238. DOI:10.17660/ActaHortic.2001.559.34
- [8] Espi E., Salmeron A., Fontecha A., García Y., Real A.I. Plastic films for agricultural applications. *J. of Plastic Film and Sheeting*, 2006, v. 22, no. 2, pp. 85–122 DOI: 10.1177/8756087906064220
- [9] Espi E., Salmeron A., Fontecha A., García Y., Real A.I. New Ultrathermic Films for Greenhouse Covers. *J. of Plastic Film and Sheeting*, 2006, v. 22, no. 1, pp. 59–68. DOI: 10.1177/8756087906062764
- [10] Kosobryukhov A.A., Kreslavski D., Khramov R.N., Bratkova L.R., Shchelokov R.N. Effect of additional low intensity luminescence Radiation 625 nm on plant growth and photosynthesis. *Biotronics*, 2000, v. 29, pp. 23–31.

- [11] Karasev V.E. *Polisvetany — polimernye svetotransformiruyushchie materialy dlya sel'skogo khozyaystva* [Polysvetans — polymer light-transforming materials for agriculture]. *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya RAN* [Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences], 1995, no. 2, pp. 66–73.
- [12] Smith J.L., Burritt D.J., Bannister P. Shoot Dry Weight, Chlorophyll and UV-B-absorbing Compounds as Indicators of a Plant's Sensitivity to UV-B Radiation. *Annals of Botany*, 2000, v. 86, no. 6, pp. 1057–1063. DOI:10.1006/anbo.2000.1270
- [13] Jansen M.A.K. Ultraviolet-B radiation effects on plants: induction of morphogenic responses. *Physiologia Plantarum*, 2002, v. 116, no. 3, pp. 423–429. DOI: 10.1034/j.1399-3054.2002.1160319.x
- [14] Delprato M.L., Krapp A.R., Carrillo N. Green Light to Plant Responses to Pathogens: The Role of Chloroplast Light-Dependent Signaling in Biotic Stress. *Photochemistry and Photobiology*, 2015, v. 91, no. 5, pp. 1004–1011. DOI: 10.1111/php.12466
- [15] Shchelokov R.N. *Polisvetany i polisvetanovyy effekt* [Polysvetans and polysvetan's effect]. *Izvestiya AN SSSR* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences], 1986, no. 10, pp. 50–55.
- [16] Minich A.S., Minich I.B., Zelen'chukova N.S., Karnachuk R.A., Golovatskaya I.F., Efimova M.V., Rayda V.S. *Rol' krasnogo luminescentnogo izlucheniya nizkoy intensivnosti v regulyatsii morfogeneza i gormonal'nogo balansa Arabidopsis thaliana* [The role of low-intensity red luminescent radiation in the regulation of morphogenesis and hormonal balance of *Arabidopsis thaliana*]. *Fiziologiya rasteniy* [Russian J. of Plant Physiology], 2006, v. 53, no. 6, pp. 762–767.
- [17] De Salvador F.R., Scarascia Mugnozza G., Vox G., Schettini E., Mastrotrilli M., BouJaoudé M. Innovative photoselective and photoluminescent plastic films for protected cultivation. *Acta Horticulturae*, 2008, v. 801(801), pp. 115–122. DOI:10.17660/actahortic.2008.801.7
- [18] Kotynova M.Yu., Besschetnov V.P. *Regeneratsionnaya sposobnost' predstaviteley roda tuja pri ukorenении cherenkov v teplitsakh* [Regenerative ability of representatives of the genus tuja when rooting cuttings in greenhouses]. *Sovremennoe lesnoe khozyaystvo — problemy i perspektivy: mater. Vseros. nauch.-prakt. konf., posvyashch. 50-letiyu «VNILGISbiotekh».* Voronezh, 3–4 dekabrya 2020. Chast'–1 [Modern forestry — problems and prospects. Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference dedicated to the 50th anniversary of VNILGISBIOTECH: Voronezh, December 3-4, 2020. Part 1]. Voronezh: Istoki, 2020, pp. 40–44.
- [19] Kotynova M.Yu., Besschetnov V.P., Besschetnova N.N. *Ukorenenie cherenkov dekorativnykh form tui zapadnoy (Thuja Occidentalis L.) v teplitsakh* [Rooting cuttings of ornamental forms of Northern white-cedar (*Thuja Occidentalis* L.) in greenhouses]. Aktual'nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa: Mater. XVIII Mezhd. nauch.-tekh. konf. [Actual problems of the development of the forest complex. Materials of XVIII International Scientific and Technical Conference], Vologda, December 1, 2020. Ed. S.M. Khamitova. Vologda: Vologda State University, 2020, pp. 147–149.
- [20] Pedlar J.H., McKenney D.W., Allen D., Lawrence K., Lawrence G., Campbell K. A street tree survey for Canadian communities: Protocol and early results. *The Forestry Chronicle*, 2013, v. 89 (6), pp. 753–758. DOI 10.5558/tfc2013-137
- [21] Mason R.L., Gunst R.F., Hess J.L. *Statistical Design and Analysis of Experiments: With Applications to Engineering and Science*. Hoboken, New Jersey (Printed in the USA): Wiley-Interscience, Wiley Series in Probability and Statistics, 2003, 752 p.
- [22] Srinagesh K. *The Principles of Experimental Research*. Waltham, Massachusetts (United States): Butterworth-Heinemann, 2005, 432 p.
- [23] Dean A. Voss D., Draguljić D. *Design and Analysis of Experiments (Springer Texts in Statistics)*, Kindle Edition. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag GmbH, 2017, 865 p.
- [24] Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Kotynova M.Yu. *Sezonnyy kharakter sodержaniya pigmentov v khvoe tui zapadnoy v usloviyakh Nizhegorodskoy oblasti* [The seasonal nature of the pigment content in the conifers of the Western tuja in the conditions of the Nizhny Novgorod region]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva* [Proceedings of the St. Petersburg Scientific Research Institute of Forestry], 2022, v. 3, pp. 38–58. DOI 10.21178/2079–6080.2022.3.3
- [25] Houpis J.L.J., Surano K.A., Cowles S., Shinn J.H. Chlorophyll and carotenoid concentrations in two varieties of *Pinus ponderosa* seedlings subjected to long-term elevated carbon dioxide. *Tree Physiology*, 1988, v. 4, no. 2, pp. 187–193. DOI: 10.1093/treephys/4.2.187
- [26] Max J.F.J., Schurr U., Tantau H.-J., Mutwiwa U.N., Hofmann T., Ulbrich A. Greenhouse Cover Technology. *Horticultural Reviews*, 2012, v. 40, (Horticultural Reviews; Book 108), pp. 259–396.
- [27] Mead R., Curnow R.N., Hasted A.M. *Statistical Methods in Agriculture and Experimental Biology*. New York: Chapman and Hall/CRC, 2003, 488 p.
- [28] Zar J.H. *Biostatistical Analysis: Fifth Edition*. Edinburg Gate: Pearson New International edition — Pearson Education Limited, 2014, 756 p.
- [29] Filatov D.A., Ivanov A.A., Svarovskaya L.I., Yudina N.V. Vliyanie svetokorrektiruyushchey plenki i guminovykh kislot na biokhicheskoe okislenie nefi v pochve [Effect of light-corrective film and humic acids on the biochemical oxidation of petroleum in the soil]. *Agrokhiimiya* [Agricultural Chemistry], 2011, v. 10, pp. 76–82.
- [30] Filatov D.A., Ivanov A.A., Svarovskaya L.I., Yudina N.V. *Aktivatsiya biokhicheskikh protsessov v neftezagryaznennoy pochve s primeneniem svetokorrektiruyushchey plenki i guminovykh kislot* [Activation of biochemical processes in oil-contaminated soil with the use of light-correcting film and humic acids]. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 2011, v. 2, pp. 226–232
- [31] Zhevorova S.V., Fedotova L.S., Timoshina N.A., Knyazeva E.V., Shabanov A.E. *Biologicheskaya aktivnost' pochvy, urozhaynost' i kachestvo kartofelya v zavisimosti ot ispol'zovaniya mikrobiologicheskikh preparatov* [Biological activity of soil, yield and quality of potatoes depending on the use of microbiological preparations]. *Rossiyskaya sel'skokhozyaystvennaya nauka* [Russian Agricultural Sciences], 2019, v. 4, pp. 31–35. DOI: 10.31857/S2500-26272019431-35

Acknowledgments

The authors express their gratitude to V.D. Kreslavsky, Doctor of Biological Sciences, for scientific discussion of the results used in the article.

The work was carried out with financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (state task number 075-01025-23-01).

Authors' information

Besschetnova Natal'ya Nikolaevna — Dr. Sci. (Agriculture), Associate Professor, Dean of the Faculty of Forestry of the Nizhny Novgorod State Agrotechnological University, besschetnova1966@mail.ru

Besschetnov Vladimir Petrovich [✉] — Dr. Sci. (Biology), Professor, Head of the Department of Forest crops of the Nizhny Novgorod State Agrotechnological University, lesfak@mail.ru

Khramov Robert Nikolaevich — Cand. Sci. (Phys. and Math.), Leading Researcher at the Institute of Theoretical and Experimental Biophysics of the Russian Academy of Sciences, khramov30@mail.ru

Received 21.08.2023.

Approved after review 20.12.2023.

Accepted for publication 06.02.2024.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

The authors declare that there is no conflict of interest

ТЕПЛОТВОРНАЯ СПОСОБНОСТЬ ФРАКЦИЙ НАДЗЕМНОЙ ФИТОМАССЫ КУЛЬТУР СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРО-ТАЕЖНОГО ЛЕСНОГО РАЙОНА

О.Н. Тюкавина^{1✉}, Д.Н. Клевцов¹, В.И. Мелехов¹, Н.А. Неверов²

¹ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), Россия, 163002, г. Архангельск, ул. Набережная Северной Двины, д. 17

²ФГБУН «Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. Н.П. Лаврова УрО РАН, Институт геодинамики и геологии», Россия, 163020, г. Архангельск, пр. Никольский, д. 20

o.tukavina@narfu.ru

Приведены результаты оценки теплотворной способности фракций наземной фитомассы культур сосны 76-летнего возраста в лишайниковом, брусничном и черничном типах условий местопроизрастания северо-таежного лесного района. Определена теплотворная способность древесины, коры, древесной зелени, ветвей, сухих сучьев в абсолютно сухом состоянии с помощью автоматизированного бомбового калориметра АБК-1В. Установлено отсутствие значимого влияния типа леса на теплотворную способность фракций наземной фитомассы сосны. Выявлена корреляционная зависимость теплотворной способности следующих частей сосны: древесины — от средней высоты древостоя, количества хвои на ветви, диаметра смоляных ходов в хвое, коры — от длины и площади поверхности хвоинки, древесной зелени — от диаметра смоляных ходов в хвоинке, площади проводящего пучка в поперечном сечении хвоинки, ветвей — от ширины и доли поздней древесины в годичном слое, площади проводящего пучка, центрального цилиндра и мезофилла в поперечном сечении хвоинки, сухих сучьев — от площади проводящего пучка, центрального цилиндра в поперечном сечении хвоинки. Рекомендуется использовать полученные параметры теплотворной способности фракций наземной фитомассы сосны как качественные характеристики растительного сырья.

Ключевые слова: сосна, теплотворная способность, древесина, кора, древесная зелень, ветви, сухие сучья

Ссылка для цитирования: Тюкавина О.Н., Клевцов Д.Н., Мелехов В.И., Неверов Н.А. Теплотворная способность фракций наземной фитомассы культур сосны обыкновенной в условиях северо-таежного лесного района // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 2. С. 27–33. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-27-33

В России заготавливается около 500 млн м³ древесины. При заготовке и переработке древесины образуются лесосечные отходы в количестве 100 млн м³ [1]. К ним относятся целые деревья и их отдельные части. Перерабатывается таких отходов лишь 20 % таких отходов [2]. В Архангельской области очень малый процент площадей лесных территорий, занимаемых приспевающими хвойными насаждениями (5,4 %), который не позволит в будущем компенсировать вырубаемые спелые и перестойные древостои [3]. Существенной экономической поддержкой арендаторов лесных участков к заготовке древесины может стать сбор и переработка отходов лесозаготовки как биоэнергетического ресурса [4].

Это направление приобретает актуальность при переводе части региональных котельных на биотопливо и в случае экспорта, поскольку данный вид топлива востребован за рубежом [5, 6].

В Архангельской области за последние 10 лет увеличились лесные площади, охваченные рубками ухода. При этом долгомошные и сфагновые типы леса занимают 46 % площади всех лесов [3], поэтому перспективным направлением стано-

вится утилизация низкосортной древесины. При невозможности реализации таких органических отходов в качестве вторичного ресурса их следует рассматривать как биотопливо [7–9]. Очистка вырубок и использование хвои для брикетирования могут служить не только альтернативным источником энергии, но и снижать опасность возникновения лесных пожаров [10, 11].

Брикетирование биоотходов — это содействие устойчивому развитию альтернативных источников энергии [12], что, несомненно, улучшит качество окружающей среды вследствие снижения объема поступающих отходов, образующихся в результате переработки каменного угля, природного газа и др. [13–15]. В современных условиях подтверждена эффективность котлов, работающих на биотопливе, поскольку они характеризуются сравнительно низким уровнем выбросов.

Такие котлы представляют собой небольшой резервуар с автоматической подачей гранул в камеру сгорания. Срок службы установок обусловлен качеством сырья. Характерным параметром является содержание золы, которая обуславливает теплотворную способность сырья. Однако высокое содержание золы снижает эффективность печи, потенциально разрушает ее внутренние

Таксационная характеристика культур сосны

Taxation characteristics of pine forest plantation

| Номер пробной площади | Состав древостоя | Средние значения | | Класс бонитета | Густота древостоя, шт./га | Относительная полнота | Запас древесины, м ³ /га |
|-------------------------------|------------------|--------------------|-----------|----------------|---------------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| | | диаметр ствола, см | высота, м | | | | |
| Сосняк вересково-лишайниковый | | | | | | | |
| 1 | 10С | 8,4 | 9,8 | V | 5021 | 1,0 | 141 |
| 2 | 10С | 13,7 | 14,1 | V | 2062 | 1,0 | 206 |
| Сосняк брусничный | | | | | | | |
| 3 | 10С | 19,4 | 19,4 | IV | 1160 | 1,0 | 329 |
| 4 | 10С | 13,5 | 17,7 | IV | 2761 | 1,1 | 301 |
| 5 | 10С | 12,2 | 18,7 | IV | 3191 | 1,0 | 328 |
| 6 | 10С | 11,9 | 15,7 | IV | 3806 | 1,0 | 248 |
| Сосняк черничный | | | | | | | |
| 7 | 8С2Б | 19,3 | 21,6 | III | 1274 | 0,8 | 311 |
| 8 | 9С1Ос | 18,1 | 21,9 | III | 2398 | 1,0 | 406 |

металлические компоненты и требует более частой чистки [16]. Отсюда следует необходимость выявления оптимального соотношения компонентов в целях достижения максимальной стойкости печи к разрушению и водопоглощению и высокой теплотворной способности биотоплива [11].

Для использования фракций надземной фитомассы деревьев в качестве источника энергии важно оценить объем их запасов и уровень теплотворной способности [17–19]. Теплотворная способность растительного сырья является не только показателем качества биотоплива, но и параметром оценки и индексирования материально-энергетических циклов в лесных экосистемах [17, 20], рисков случайных и преднамеренных лесных пожаров, сжигания ископаемого топлива, изменений климата и возможности достижения локальной и глобальной углеродной нейтральности [17].

Цель работы

Цель работы — оценка теплотворной способности фракций наземной фитомассы культур сосны обыкновенной.

Материалы и методы

Исследования проведены в Емецком лесничестве, расположенном в пределах северо-таежного лесного района. Объект исследований — 76-летние культуры сосны обыкновенной в лишайниковом, брусничном и черничном типах лесорастительных условий (табл. 1). Культуры сосны были созданы посевом семян на площадках размером 0,3×0,5 м по 20...30 шт. Уход за культурами не проводился.

Заложение пробных площадей (ПП) и отбор образцов проводили по стандартным методикам [21]. На каждой ПП отбирали в трехкратной повторно-

сти мелкое, среднее и крупное модельные деревья. Прирост стволовой древесины определяли с помощью полуавтоматического устройства LINT-AB-6 с точностью до ±0,01 мм. Теплотворную способность древесины определяли в абсолютно сухом состоянии с помощью автоматизированного калориметра сгорания бомбового АБК-1В.

Ассимиляционный аппарат всех возрастов отбирали со средней ветви кроны модельного дерева. Длину, ширину и толщину хвоинки измеряли штангенциркулем. Из средней части хвоинки готовили поперечные срезы с использованием микротомы санного МС-2. Измеряли параметры гистологических элементов микроскопом Zeiss Axio Scope.A1 с помощью программного обеспечения IMAGE-PRO INSIGHT 8,0.

Результаты и обсуждение

Среднее значение теплотворной способности фракций надземной фитомассы сосны изменяется от 20 500 до 22 100 Дж/г (табл. 2). Теплотворная способность коры, древесной зелени, ветвей в разных типах леса значимо не различается. Коэффициент изменчивости составляет от 0,2 до 1,9 %, т. е. изменчивость невелика. Теплотворная способность древесины в сосняках черничных и брусничных значимо не различается. В сосняках лишайниковых средняя теплоемкость древесины сосны может отличаться на 3,4 %. Различие с сосняком черничным составляет 21 462 ± 316 Дж/г, с брусничным — 20 731 ± 133 Дж/г. С улучшением лесорастительных условий отмечается тенденция снижения теплотворной способности сухих сучьев. В сосняках черничных теплотворная способность сухих сучьев сосны ниже на 2,0 % по сравнению с сосняками лишайниковыми и на 1,9 % по сравнению с сосняками брусничными ($t = 5,6$ и $t = 2,4$ соответственно при $t_{st} = 3,2$; $p = 0,95$).

Теплотворная способность фракций надземной фитомассы сосны

Calorific value of pine aerial phytomass fractions

| Тип леса | Фракции надземной фитомассы, Дж/г | | | | |
|---------------------|-----------------------------------|-------------|------------------|-------------|-------------|
| | Древесина | Кора | Древесная зелень | Ветви | Сухие сучья |
| Сосняк лишайниковый | 21005 ± 105 | 21233 ± 146 | 22103 ± 77 | 21177 ± 19 | 21077 ± 63 |
| Сосняк брусничный | 20602 ± 54 | 21479 ± 87 | 21878 ± 107 | 21057 ± 107 | 21377 ± 162 |
| Сосняк черничный | 20535 ± 42 | 21446 ± 47 | 22051 ± 51 | 21263 ± 66 | 20655 ± 41 |

В сосняках лишайниковых при сокращении густоты древостоя в 2,4 раза теплотворная способность сократилась на 3,4 %. Однако в сосняках брусничных при сокращении густоты древостоя в 3,3 раза изменение теплотворной способности древесины не зафиксировано. При анализе влияния таксационных характеристик древостоя на теплотворную способность фракций надземной фитомассы сосны обыкновенной выявлена только высокая обратная теснота связи теплотворной способности древесины сосны и средней высоты древостоя ($r = -0,83$ при $t = 7,50$), что согласуется с результатами исследований других авторов [20, 22].

Наибольшей теплотворной способностью характеризуется преимущественно древесная зелень, наименьшей — древесина. Теплотворная способность древесной зелени значимо превосходит все остальные рассматриваемые фракции на 2,8...7,4 %. В большинстве случаев значение теплотворной способности сухих сучьев примерно соответствует таковым древесины, а ветвей — теплотворной способности коры. Фракции надземной фитомассы сосны обыкновенной в порядке снижения теплотворной способности располагаются следующим образом:

– ПП № 1 — древесная зелень (22 430 Дж/г) > древесина (21 462 Дж/г) > кора (21 342 Дж/г) > ветви (21 233 Дж/г) > сухие сучья (20 960 Дж/г);

– ПП № 2 — древесная зелень (21 999 Дж/г) > сухие сучья (21 303 Дж/г) > кора (21 123 Дж/г) > ветви (21 109 Дж/г) > древесина (20 731 Дж/г);

– ПП № 3 — древесная зелень (22 038 Дж/г) > кора (21 569 Дж/г) > ветви (20 917 Дж/г) > сухие сучья (20 857 Дж/г) > древесина (20 785 Дж/г);

– ПП № 4 — древесная зелень (22 855 Дж/г) > ветви (21 464 Дж/г) > сухие сучья (21 440 Дж/г) > кора (21 330 Дж/г) > древесина (20 551 Дж/г);

– ПП № 5 — древесная зелень (22 112 Дж/г) > кора (21 377 Дж/г) > сухие сучья (21 252 Дж/г) > ветви (20 762 Дж/г) > древесина (20 473 Дж/г);

– ПП № 6 — древесная зелень (21 425 Дж/г) > сухие сучья (21 417 Дж/г) > кора (21 282 Дж/г) > ветви (21 122 Дж/г) > древесина (20 662 Дж/г);

– ПП № 7 — древесная зелень (21 932 Дж/г) > кора (21 489 Дж/г) > ветви (21 108 Дж/г) > сухие сучья (20 594 Дж/г) > древесина (20 542 Дж/г);

– ПП № 8 — древесная зелень (22 246 Дж/г) > ветви (21 481 Дж/г) > кора (21 348 Дж/г) > сухие сучья (20 779 Дж/г) > древесина (20 483 Дж/г).

Изменение позиций в ранжировании фракций надземной фитомассы деревьев по теплотворной способности обсуждается в работе [20] и определяется содержанием экстрактивных веществ, зольностью и разницей данного показателя между рангами [23]. Чем выше содержание углерода в биомассе, тем выше теплота сгорания [24]. На теплоту сгорания оказывает влияние содержание лигнина и экстрактивных веществ [25]. Кора, ветви и хвоя, как правило, обладают более высокой теплотворной способностью вследствие повышенной концентрации смолы и лигнина [17]. В результате закономерно выявление высокой значимой тесноты связи теплотворной способности ветвей с шириной поздней зоны годичного слоя, с процентом поздней древесины ($r = 0,74$ при $t = 6,5$; $r = 0,79$ при $t = 8,3$ соответственно). Смоляные ходы приурочены к поздней зоне годичного кольца. Теснота связи теплотворной способности древесины с приростом поздней древесины и доли ее в годичном слое лишь умеренная. Остальные фракции надземной фитомассы сосны не коррелируют с обсуждаемыми показателями.

Хвоя является индикатором благополучия лесорастительных условий [26]. Качество лесорастительных условий обуславливает синтез экстрактивных веществ. В связи с этим морфологические и анатомические показатели хвои способны характеризовать теплотворную способность дерева [21]. Таким образом, чем больше количество хвои на ветви, тем ниже теплотворная способность стволовой древесины и коры ($r = -0,75$ при $t = 7,0$; $r = -0,54$ при $t = 3,8$ соответственно). При увеличении количества хвои на ветви уменьшаются диаметры смоляных ходов ($r = -0,87$ при $t = 10$). В результате чем больше диаметры смоляных ходов, тем выше теплотворная способность древесины (табл. 3). Теснота связи между данными показателями высокая значимая. Смолоносная система хвои и древесины не имеют взаимной связи, хотя смолоносная система хвои в целом отражает интенсивность синтеза живицы деревом.

Теснота связи между диаметром смоляных ходов и теплотворной способностью древесной

Корреляционная связь характеристик хвои с теплотворной способностью фракций надземной фитомассы сосны

Correlation of the needles characteristics of with the calorific value of pine aerial phytomass fractions

| Признак | Теплотворная способность фракций, Дж/г | | | | | | | | | |
|--|--|------|------|------|------------------|-----|-------|------|-------------|-----|
| | Древесина | | Кора | | Древесная зелень | | Ветви | | Сухие сучья | |
| | Кк | Дкк | Кк | Дкк | Кк | Дкк | Кк | Дкк | Кк | Дкк |
| Длина хвоинки, мм | -0,03 | 0,1 | 0,77 | 7,8 | -0,11 | 0,5 | 0,07 | 0,3 | -0,13 | 0,5 |
| Площадь поверхности хвоинки, мм ² | -0,14 | 0,4 | 0,72 | 6,0 | 0,03 | 0,1 | -0,26 | 1,1 | -0,39 | 1,9 |
| Диаметр смоляного хода, мкм | 0,88 | 10,6 | 0,34 | 1,6 | 0,59 | 4,0 | 0,04 | 0,15 | -0,38 | 1,8 |
| Площадь проводящего пучка в поперечном сечении хвои, % | -0,65 | 4,5 | 0,01 | 0,04 | -0,65 | 4,5 | 0,67 | 4,8 | 0,66 | 4,7 |
| Площадь центрального цилиндра в поперечном сечении хвои, % | -0,34 | 1,6 | 0,02 | 0,08 | -0,40 | 1,9 | 0,66 | 4,6 | 0,72 | 6,0 |
| Площадь мезофилла в поперечном сечении хвоинки, % | -0,1 | 0,4 | 0,08 | 0,3 | 0,01 | 0,1 | -0,72 | 5,9 | -0,48 | 2,5 |

Кк — коэффициент корреляции; Дкк — достоверность коэффициента корреляции.

зелени ниже по сравнению с древесиной ($r = 0,59$ при $t = 4$). Это обусловлено составом древесной зелени из хвои и мелких веточек, которые отличаются стабильно повышенным уровнем концентрации смолы.

Синтез живицы связан с водным режимом дерева, интенсивность которого отражается на размерах центрального цилиндра хвоинки и соотношении в ней проводящей и ассимилирующей ткани. С улучшением условий произрастания площадь центрального цилиндра в поперечном сечении хвои возрастет за счет площади мезофилла [26]. С увеличением площади центрального цилиндра в поперечном сечении хвоинки возрастает теплотворная способность ветвей и сухих сучьев ($r = 0,66$ при $t = 4,6$; $r = 0,72$ при $t = 6,0$ соответственно). Теплотворная способность коры коррелирует с длиной хвоинки ($r = 0,77$ при $t = 7,8$), которая также является индикатором лесорастительных условий.

Выводы

Оценена теплотворная способность фракций наземной фитомассы культур сосны обыкновенной. Полученные в процессе исследования параметры теплотворной способности древесины сосны могут использоваться как качественные характеристики растительного сырья. Выявленные корреляционные зависимости теплотворной способности древесины сосны от средней высоты древостоя, количества хвои на ветви, диаметра смоляных ходов в хвое; теплотворной способности коры от длины и площади поверхности хвоинки; теплотворной способности древесной зелени от

диаметра смоляных ходов в хвоинке, площади проводящего пучка в поперечном сечении хвоинки; теплотворной способности ветвей от ширины и доли поздней древесины в годичном слое, площади проводящего пучка, центрального цилиндра и мезофилла в поперечном сечении хвоинки; теплотворной способности сухих сучьев от площади проводящего пучка, центрального цилиндра в поперечном сечении хвоинки могут применяться для прогноза энергетической ценности древостоя.

Список литературы

- [1] Куницкая О.А., Помигуев А.В., Бурмистрова Д.Д., Тихонов Е.А., Стородубцева Т.Н. Результаты экспериментальных выдержек брикетирования лесосечных отходов в условиях лесных терминалов // Лесотехнический журнал, 2021. № 3. С. 109–120.
DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.3/9
- [2] Алексеенко А.А., Шушпанова Д.В. Переработка древесины лесоперерабатывающего комплекса России и ее отходов во вторичные продукты // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология, химия, 2021. Т. 7 (73). № 2. С. 3–13.
- [3] Ильинцев А.С., Шамонтьев И.Г., Третьяков С.В. Современная динамика лесопользования в бореальных лесах России (на примере Архангельской области) // Лесотехнический журнал, 2021. № 3. С. 45–62.
DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.3/4
- [4] Сунгурова Н.Р., Клевцов Д.Н. Биоэнергетический потенциал северных лесов // Хвойные бореальной зоны, 2021. Т. 39. № 5. С. 385–391.
- [5] Pishvae Mir S., Mohseni Sh., Bairamzadeh S. Biomass to Biofuel Supply Chain Design and Planning under Uncertainty. Book: Academic Press. 2020. 271 p.
<https://doi.org/10.1016/C2019-0-01795-5>
- [6] Whitaker J., Field J.L., Bernacchi C.J., Cerri C.P., Ceulemans R., Davies C.A., De Lucia E.H., Donnison I.S., Mc Calmont J.P., Paustian K., Rowe R.L., Smith P., Thorn-

- ley P., Mc Namara N.P. Consensus, uncertainties and challenges for perennial bioenergy crops and land use // *GCB Bioenergy*, 2019, v. 10, no. 3, pp. 150–164. DOI: 10.1111/gcbb.12488
- [7] Ширинкина Е.С., Вайсман Я.И., Курило О.Н. Использование энергетического потенциала органических отходов при их сжигании на утилизационных установках // *Экология и промышленность России*, 2018. Т. 22. № 7. С. 54–58. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-7-54-58
- [8] Agrawai A., Sood D. Development and Performance Analysis of Pine Needle Based Downdraft Gasifier System // *Advances in Clean Energy Technologies*, 2021, pp. 163–170. DOI:10.1007/978-981-16-0235-1_13
- [9] Sreekumar A., Mohan O., Kurian V., Mvolo C., Kumar A. A review of Canadian wood conversion technologies for the production of fuels and chemicals // *The Canadian J. of Chemical Engineering*, 2023, pp. 1–29. DOI:10.1002/cjce.24820
- [10] Mandal S., Kumar G.V.P., Bhattacharya T.K., Tanna H.R., Jena P.C. Briquetting of Pine Needles (*Pinus roxburgii*) and Their Physical, Handling and Combustion Properties // *Waste and Biomass Valorization*, 2019, v. 10, pp. 2415–2424. DOI:10.1007/s12649-018-0239-4
- [11] Sharma K.H., Kumain A., Bhattacharya T.K. Characteristic properties of pine needle biochar blocks with distinctive binders // *Current science*, 2020, v. 118, no. 12, p. 25, pp. 1959–1967.
- [12] Rawat S., Kumar S. Critical review on processing technologies and economic aspect of bio-coal briquette production // *Preparative Biochemistry & Biotechnology*, 2021, v. 52, no. 8, pp. 1–17. DOI:10.1080/10826068.2021.2001754
- [13] Ansari T., Chandra G., Gupta P.K., Joshi G., Rana V. Synthesis of pine needle cyanoethyl cellulose using Taguchi L25 orthogonal array // *Industrial Crops and Products*, 2023, v. 191, no. 7–8, p. 115973. DOI:10.1016/j.indcrop.2022.115973
- [14] Ladapo H.L., Alli A.A., Dickson P.O. Evaluation of energy potentials of briquettes produced from maize and sawmill residues // *J. of Research in Forestry, Wildlife and Environment*, 2020, v. 12, no. 3, pp. 192–197.
- [15] Yerima I., Grema M. Z. The Potential of Coconut Shell as Biofuel // *The J. of Middle East and North Africa Sciences*, 2018, v. 4, no. 8, pp. 11–15.
- [16] Krajnc N. Wood fuels handbook. Pristina: Food and agriculture organization of the United Nations, 2015, 31 p.
- [17] Petráš R., Mecko J., Kukla J., Kuklová M. Energy stored in above-ground biomass fractions and model trees of the main coniferous woody plants // *Sustainability*, 2021, v. 13, no. 22, pp. 1–17. DOI:10.3390/su132212686
- [18] Petráš R., Mecko J., Kukla J., Kuklová M. Modelling the development of above-ground biomass energy reserves of four economically important coniferous woody species // *Forests*, 2023, v. 14, no. 2, pp. 388. DOI:10.3390/f14020388
- [19] Rak A.E., Sirajudin M.Sh., Omar S.a.S., Salam M.A. Energy content based on oil palm fronds portions and particle size // *AIP Conference Proceedings*, 2022, v. 2454, no. 1, p. 060025. DOI:10.1063/5.0078498
- [20] Zeng W., Tang S., Xiao Q. Calorific values and ash contents of different parts of Masson pine trees in southern China // *J. of Forestry Research*, 2014, v. 25, no. 4, pp. 779–786. DOI 10.1007/s11676-014-0525-3
- [21] Тюкавина О.Н., Клевцов Д.Н., Адаи Д.М. Биоэнергетический потенциал надземной фитомассы культур сосны обыкновенной таежной зоны // *ИзВУЗ Лесной журнал*, 2018. № 4 (364). С. 49–55.
- [22] Бондарев В.Я., Гусева Л.М. Особенности подготовки сырья для пиролиза древесины // *Вестник Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии*, 2014. № 4. С. 106–110.
- [23] Zhang W., Cai H.D., Nong S.Q. The caloric values of main tree species in Guangxi // *Central South Forest Inventory and Planning*, 2011, v. 30, no. 1, pp. 50–53. DOI:10.1007/s11676-014-0525-3
- [24] Nelson N., Darkwa J., Calautit J., Worall M., Mokaya R., Adjei E., Kemausuor F., Ahiekpor J. Potential of Bioenergy in Rural Ghana // *Sustainability*, 2021, v. 13, no. 1, p. 381. DOI:10.3390/su13010381
- [25] Nasser R.A., Aref I.M. Fuelwood Characteristics of Six Acacia Species Growing Wild in the Southwest of Saudi Arabia as Affected by Geographical Location // *BioResources*, 2014, no. 9(1), pp. 1212–1214. DOI: 10.15376/biores.9.1.1212-1224
- [26] Tyukavina O.N., Neverov N.A., Klevtsov D.N. Influence of growing conditions on morphological and anatomical characteristics of pine needles in the northern taiga // *J. of Forest Science*, 2019, vol. 65, no.1, pp. 33–39. DOI: 10.17221/126/2019-JFS

Сведения об авторах

Тюкавина Ольга Николаевна [✉] — д-р. с.-х. наук, доцент кафедры биологии, экологии и биотехнологии Высшей школы естественных наук и технологий, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), o.tukavina@narfu.ru

Клевцов Денис Николаевич — канд. с.-х. наук, доцент кафедры биологии, экологии и биотехнологии Высшей школы естественных наук и технологий, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), d.klevtsov@narfu.ru

Неверов Николай Александрович — канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр. лаборатории глубинного геологического строения и динамики литосферы Института геодинамики и геологии, ФГБУН «Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. Н.П. Лаврова УрО РАН, Институт геодинамики и геологии», na-neverov@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.10.2023.

Одобрено после рецензирования 18.12.2023.

Принята к публикации 29.02.2024.

CALORIFIC VALUE OF AERIAL PHYTO MASS FRACTIONS OF SCOTS PINE IN NORTH TAIGA FOREST REGION

O. N. Tyukavina¹✉, D.N. Klevtsov¹, V.I. Melekhov¹, N.A. Neverov²

¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 163002, Arkhangelsk, Russia

²N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 20, Nikolsky Ave., 163020, Arkhangelsk, Russia

o.tukavina@narfu.ru

The estimation results of calorific value fractions of aerial phytomass of 76-year-old pine species in lichen, lingonberry and bilberry types forest conditions of the northern taiga region are presented. The calorific value of wood, bark, foliage, branches, dry twigs in absolutely dry state was determined with automated bomb calorimeter ABK-1V. Not any significant influence of forest type on the calorific value of pine ground phytomass fractions was established. The correlation dependence of calorific value of the following parts of pine was revealed: wood — on the average stand height, number of needles per branch, diameter of resin channel in the needles, bark — on the length and surface area of the needles, woody greenery — on the diameter of resin channels in the needles, area of the vascular bundle in the cross section of the needles, branches — from the width and proportion of late wood in the annual layer, area of the vascular bundle, central cylinder and mesophyll in the cross-section of needles, dry twigs — from the area of the vascular bundle, central cylinder in the cross-section of needles. It is recommended to use the obtained parameters of calorific value of pine aerial phytomass fractions as qualitative characteristics of planting materials.

Keywords: pine, calorific value, wood, bark, foliage, branches, dry twigs


Suggested citation: Tyukavina O.N., Klevtsov D.N., Melekhov V.I., Neverov N.A. *Teplotvornaya sposobnost' fraktsiy nadzemnoy fitomassy kul'tur sosny obyknovennoy v usloviyakh severo-taizhnogo lesnogo rayona* [Calorific value of aerial phytomass fractions of scots pine in north taiga forest region]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 2, pp. 27–33. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-27-33

References

- [1] Kunitskaya O.A., Pomiguyev A.V., Burmistrova D.D., Tikhonov E.A., Storodubtseva T.N. *Rezultaty eksperimental'nykh vyderzhek briketirovaniya lesosechnykh otkhodov v usloviyakh lesnykh terminalov* [Results of experimental tests for briquetting logging waste in forest terminals]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Journal], 2021, no. 3, pp. 109–120. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.3/9
- [2] Alekseenko A.A., Shushpanova D.V. *Pererabotka drevesiny lesopererabatyvayushchego kompleksa Rossii i ee otkhodov vo vtorichnye produkty* [Processing of wood from the Russian timber processing complex and its waste into secondary products]. *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta im. V.I. Vernadskogo. Biologiya, khimiya* [Scientific notes of the Crimean Federal University. IN AND. Vernadsky. Biology, chemistry], 2021, t. 7 (73), no. 2, pp. 3–13.
- [3] Iilintsev A.S., Shamont'ev I.G., Tret'yakov S.V. *Sovremennaya dinamika lesopol'zovaniya v boreal'nykh lesakh Rossii (na primere Arkhangel'skoy oblasti)* [Modern dynamics of forest management in boreal forests of Russia (on the example of the Arkhangelsk region)]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering Journal], 2021, no. 3, pp. 45–62. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.3/4
- [4] Sungurova N.R., Klevtsov D.N. *Bioenergeticheskiy potentsial severnykh lesov* [Bioenergy potential of northern forests]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Conifers of the boreal zone], 2021, t. 39, no. 5, pp. 385–391.
- [5] Pishvae Mir S., Mohseni Sh., Bairamzadeh S. *Biomass to Biofuel Supply Chain Design and Planning under Uncertainty*. Book: Academic Press. 2020. 271 p. <https://doi.org/10.1016/C2019-0-01795-5>
- [6] Whitaker J., Field J.L., Bernacchi C.J., Cerri C.P., Ceulemans R., Davies C.A., De Lucia E.H., Donnison I.S., Mc Calmont J.P., Paustian K., Rowe R.L., Smith P., Thornley P., Mc Namara N.P. *Consensus, uncertainties and challenges for perennial bioenergy crops and land use*. *GCB Bioenergy*, 2019, v. 10, no. 3, pp. 150–164. DOI: 10.1111/gcbb.12488
- [7] Shirinkina E.S., Vaysman Ya.I., Kurilo O.N. *Ispol'zovanie energeticheskogo potentsiala organicheskikh otkhodov pri ikh szhiganii na utilitatsionnykh ustanovkakh* [Using the energy potential of organic waste when burning it in recycling plants]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2018, t. 22, no. 7, pp. 54–58. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-7-54-58
- [8] Agrawai A., Sood D. *Development and Performance Analysis of Pine Needle Based Downdraft Gasifier System*. *Advances in Clean Energy Technologies*, 2021, pp. 163–170. DOI:10.1007/978-981-16-0235-1_13
- [9] Sreekumar A., Mohan O., Kurian V., Mvolo C., Kumar A. *A review of Canadian wood conversion technologies for the production of fuels and chemicals*. *The Canadian J. of Chemical Engineering*, 2023, pp. 1–29. DOI:10.1002/cjce.24820
- [10] Mandal S., Kumar G.V.P., Bhattacharya T.K., Tanna H.R., Jena P.C. *Briquetting of Pine Needles (Pinus roxburgii) and Their Physical, Handling and Combustion Properties*. *Waste and Biomass Valorization*, 2019, v. 10, pp. 2415–2424. DOI:10.1007/s12649-018-0239-4
- [11] Sharma K.H., Kumain A., Bhattacharya T.K. *Characteristic properties of pine needle biochar blocks with distinctive binders*. *Current science*, 2020, v. 118, no. 12, v. 25, pp. 1959–1967.
- [12] Rawat S., Kumar S. *Critical review on processing technologies and economic aspect of bio-coal briquette production*. *Preparative Biochemistry & Biotechnology*, 2021, v. 52, no. 8, pp. 1–17. DOI:10.1080/10826068.2021.2001754
- [13] Ansari T., Chandra G., Gupta P.K., Joshi G., Rana V. *Synthesis of pine needle cyanoethyl cellulose using Taguchi L25 orthogonal array*. *Industrial Crops and Products*, 2023, v. 191, no. 7–8, p. 115973. DOI:10.1016/j.indcrop.2022.115973

- [14] Ladapo H.L., Alli A.A., Dickson P.O. Evaluation of energy potentials of briquettes produced from maize and sawmill residues. *J. of Research in Forestry, Wildlife and Environment*, 2020, v. 12, no. 3, pp. 192–197.
- [15] Yerima I., Grema M. Z. The Potential of Coconut Shell as Biofuel. *The J. of Middle East and North Africa Sciences*, 2018, v. 4, no. 8, pp. 11–15.
- [16] Krajnc N. Wood fuels handbook. Pristina: Food and agriculture organization of the United Nations, 2015, 31 p.
- [17] Petráš R., Mecko J., Kukla J., Kuklová M. Energy stored in above-ground biomass fractions and model trees of the main coniferous woody plants. *Sustainability*, 2021, v. 13, no. 22, pp. 1–17. DOI:10.3390/su132212686
- [18] Petráš R., Mecko J., Kukla J., Kuklová M. Modelling the development of above-ground biomass energy reserves of four economically important coniferous woody species. *Forests*, 2023, v. 14, no. 2, pp. 388. DOI:10.3390/f14020388
- [19] Rak A.E., Sirajudin M.Sh., Omar S.a.S., Salam M.A. Energy content based on oil palm fronds potions and particle size. *AIP Conference Proceedings*, 2022, v. 2454, no. 1, p. 060025. DOI:10.1063/5.0078498
- [20] Zeng W., Tang S., Xiao Q. Calorific values and ash contents of different parts of Masson pine trees in southern China. *J. of Forestry Research*, 2014, v. 25, no. 4, pp. 779–786. DOI 10.1007/s11676-014-0525-3
- [21] Tyukavina O.N., Klevtsov D.N., Adai D.M. *Bioenergeticheskiy potentsial nadzemnoy fitomassy kul'tur sosny obyknovennoy taezhnoy zony* [Bioenergy potential of above-ground phytomass of Scots pine crops in the taiga zone]. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*, 2018, no. 4 (364), pp. 49–55.
- [22] Bondarev V.Ya., Guseva L.M. *Osobennosti podgotovki syr'ya dlya piroliza drevesiny* [Features of the preparation of raw materials for wood pyrolysis]. *Vestnik Nizhegorodskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii [Bulletin of the Nizhny Novgorod State Agricultural Academy]*, 2014, no. 4, pp. 106–110.
- [23] Zhang W., Cai H.D., Nong S.Q. The caloric values of main tree species in Guangxi. *Central South Forest Inventory and Planning*, 2011, v. 30, no. 1, pp. 50–53. DOI:10.1007/s11676-014-0525-3
- [24] Nelson N., Darkwa J., Calautit J., Worall M., Mokaya R., Adjei E., Kemausuor F., Ahiekpor J. Potential of Bioenergy in Rural Ghana. *Sustainability*, 2021, v. 13, no. 1, p. 381. DOI:10.3390/su13010381
- [25] Nasser R.A., Aref I.M. Fuelwood Characteristics of Six Acacia Species Growing Wild in the Southwest of Saudi Arabia as Affected by Geographical Location. *BioResources*, 2014, no. 9(1), pp. 1212–1214. DOI: 10.15376/biores.9.1.1212-1224
- [26] Tyukavina O.N., Neverov N.A., Klevtsov D.N. Influence of growing conditions on morphological and anatomical characteristics of pine needles in the northern taiga. *J. of Forest Science*, 2019, vol. 65, no.1, pp. 33–39. DOI: 10.17221/126/2019-JFS

Authors' information

Tyukavina Ol'ga Nikolaevna  — Dr. Sci. (Agriculture), Associate Professor of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, o.tukavina@narfu.ru

Klevtsov Denis Nikolaevich — Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, d.klevtsov@narfu.ru

Melekhov Vladimir Ivanovich — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Department of Logging Production and Materials Processing of the Higher School of Engineering, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov

Neverov Nikolay Aleksandrovich — Cand. Sci. (Agriculture), Senior researcher of Laboratory of the Deep Geological Structure and Dynamics of the Lithosphere of the Institute of Geodynamics and Geology of the Federal Research Center for the Integrated Study of the Arctic of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences named after N.P. Laverov, na-neverov@yandex.ru

Received 27.10.2023.

Approved after review 18.12.2023.

Accepted for publication 29.02.2024.

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

ИНТЕГРАЦИЯ КОНЦЕПЦИИ ЭКОСИСТЕМНЫХ УСЛУГ В ГОРОДСКОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ БЫСТРОРАСТУЩИХ ЗЕЛЕНых НАСАЖДЕНИЙ

В.А. Фролова¹, О.В. Чернышенко²✉

¹Казенное предприятие города Москвы «Выставка достижений народного хозяйства» (КП ВДНХ), Россия, 129223, г. Москва, пр-кт Мира, д. 119, стр. 230

²ФГБОУ 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

tchernychenko@mgul.ac.ru

Рассмотрена интеграция концепции экосистемных услуг в городские климатические проекты для создания карбоновой фермы на заброшенных промышленных землях Москвы. Разработана технология высокоэффективной секвестрации диоксида углерода из атмосферы с учетом фиторемедиации почв. Выращивание древесных культур на деградированных землях посредством карбоновых ферм позволит сократить выбросы в атмосферу трех наиболее важных парниковых газов: диоксида углерода (CO₂), метана (CH₄) и закиси азота (N₂O). Для расчета экосистемных услуг древесных растений были выделены восемь типов зеленых территорий Москвы. Создание быстрорастущих зеленых насаждений предполагается на территориях пустырей и заброшенных промышленных районов. Площадь таких земель в каждом административной районе рассчитывалась в программе SAS Planet, при этом общая площадь в Москве составила около 3227,9 га. Предложен климатический проект по созданию карбоновой фермы с коротким севооборотом Short rotation woody crops (SRC). Для фиторемедиации загрязняющих веществ были выбраны 30 устойчивых в городе и быстрорастущих видов древесных растений. Создание ландшафта биологических коридоров обеспечит экосистемные услуги для региона, в том числе смягчение последствий изменения климата, увеличение поглощения диоксида углерода, улучшение взаимосвязанности лесных экосистем, расширение среды обитания и сохранение флоры и фауны в пределах Московского региона.

Ключевые слова: деградация земель, климатический проект, экосистемные услуги, биоразнообразие

Ссылка для цитирования: Фролова В.А., Чернышенко О.В. Интеграция концепции экосистемных услуг в городское планирование быстрорастущих зеленых насаждений // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 2. С. 34–44. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-34-44

Деградация земель, вызванная антропогенными процессами, усиливает выброс парниковых газов (ПГ) и снижает скорость поглощения углерода компонентами экосистемы [1]. По данным ООН, более 250 млн чел. в мире непосредственно страдают от деградации земель [2]. Одна из причин расширения деградации земель — постоянное увеличение количества захоронения промышленных и коммунальных отходов. Такие залежи вызывают множество экологических проблем, требующих новых решений с учетом региональных особенностей городских систем и ландшафтов [3, 4]. Деградацию земель можно остановить рекультивацией и восстановлением почв. Согласно Постановлению Правительства РФ № 800 от 10.07.2018 «О проведении рекультивации и консервации земель», рекультивация должна обеспечивать восстановление земель до состояния соответствия нормативам качества окружающей среды и требованиям законодательства Российской Федерации [5]. Рекультивации подлежат земли, нарушенные в результате строи-

тельства, добычи полезных ископаемых, захоронения промышленных отходов и в других производственных случаях. Такие земли используются в климатических проектах для создания зеленых насаждений во многих странах. Увеличение зеленых насаждений в городах, лесовосстановление и плантации являются основными методами восстановления среды обитания растений и животных, повышения плодородия почв для смягчения последствий деградации окружающей среды.

Посадка деревьев помогает бороться с проблемой опустынивания в крупнейшем проекте 2021 г «Ближневосточная зеленая инициатива, The Middle East Green Initiative (MGI)» [6]. Проектом предполагается восстановление земель в регионе путем посадки 50 млрд деревьев, подходящих для местных условий, и получения экосистемных выгод от снижения темпов опустынивания, эрозии почв, количества песчаных бурь и понижения местной температуры воздуха и поверхностей, для того чтобы регион стал более пригодным для жизни людей. Саудовская Аравия выделила 2,5 млрд дол. США на поддержку проекта MGI.

Главным в климатическом проекте по изменению землепользования является полный учет выбросов парниковых газов. При реализации проектов по смягчению последствий изменения климата оценка экосистемных услуг по защите водосборных бассейнов, сохранения биоразнообразия и поддержания необходимого уровня питательных веществ в почве может стать дополнительным средством экономической выгоды. Экосистемные услуги определяются как ценности, которые «люди извлекают из функционирующих экосистем, экологических характеристик, функций или процессов, которые прямо или косвенно способствуют благополучию человека» [7, 8]. Анализ и расчет экосистемных услуг включает верифицированные методы их количественного определения, выбор индикаторов для расчета и экономической оценки [9, 10]. Однако выбор индикатора достаточно сложен, так как его величина зависит от сочетания социальных и природных переменных. Чем больше экосистемных услуг доступно и хорошего качества, тем лучше для устойчивого развития города.

В РФ с 2022 г реализуется система обращения углеродных единиц, которая помогает компенсировать углеродный след продукции сокращением выбросов парниковых газов [11]. Климатические проекты по управлению зелеными насаждениями для компенсации выбросов парниковых газов рассматриваются как важный вариант смягчения последствий изменения климата и участия в углеродных рынках. Выращивание древесных культур на деградированных землях посредством карбоновых ферм позволит сократить выбросы в атмосферу трех наиболее важных парниковых газов: диоксида углерода (CO_2), метана (CH_4) и закиси азота (N_2O). Диоксид углерода CO_2 депонируется в «поглотителях», поглощаясь из атмосферы в процессе фотосинтеза растений. Городские карбоновые фермы необходимы для компенсации высоких выбросов углерода в городах, которые, как известно, являются источниками парниковых газов.

Цель работы

Цель работы — интеграция концепции экосистемных услуг в климатический проект по организации карбоновой фермы на заброшенных промышленных землях Москвы и разработка технологии высокоэффективной секвестрации диоксида углерода из атмосферы, используя фиторемедиацию деградированных почв.

Материалы и методы

Кафедра ландшафтной архитектуры и садово-паркового строительства МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал) совместно с ГПБУ

«Мосэкомониторинг» Департамента природопользования и охраны окружающей среды Москвы разработали Модель интеллектуального управления зеленым фондом Москвы. Модель базируется на расчетах количественной оценки экосистемных услуг озелененных и природных территорий Москвы для достижения устойчивости и экологической эффективности городских объектов ландшафтной архитектуры в ближайшие десятилетия.

Москва стоит на р. Москва в центре Восточно-Европейской равнины, площадь города составляет 2561 км². Отдельные ландшафты, каждый из которых имеет свои природные особенности, повлияли на формирование современного облика города. Климат в городе близок к умеренно-холодному климату. По данным метеонаблюдений за последние десять лет средняя годовая температура воздуха в Москве составляет 6,6 °С, в год выпадает около 719 мм осадков. Июль является самым теплым месяцем года: температура в июле в среднем 20,7 °С, именно в июле выпадает самое большое количество осадков, в среднем 78 мм. Зеленый фонд города включает в себя большое количество озелененных и природных территорий, которые занимают более 49 % его площади [12].

Для расчета экосистемных услуг зеленых насаждений мы выделили следующие типы зеленых территорий для Москвы с учетом международных классификаций [13]:

1. Зеленые фасады зданий и крыши (точечные объекты).
2. Городские зеленые насаждения внутри застроенных территорий (сильно фрагментированные небольшие площади).
3. Парки и городские леса (крупные массивы искусственного происхождения).
4. Участки, пригодные для садоводства, и выращивания съедобной растительности
5. Водные пространства (включая также пространства с растительностью).
6. Пустыри и заброшенные промышленные районы.
7. Природные зеленые и водные пространства, а также территории, возникшие в результате естественного возобновления (без участия человека).
8. Другие городские зеленые пространства — неопределенная растительность.

Городские открытые пространства, которые еще не застроены, например, пустыри и заброшенные промышленные районы, могут быть использованы для проектов озеленения и обеспечения множества экологических функций и экосистемных услуг. Для определения площади пустырей в качестве подосновы были выбраны спутниковые карты компании «Yandex». «Нарезка» спутниковых снимков определенной территории

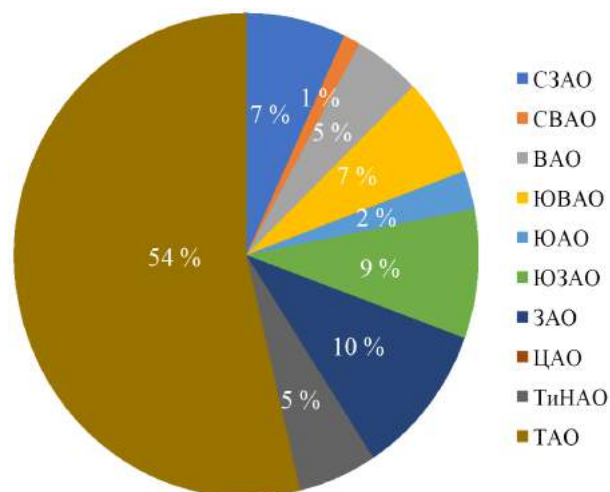


Рис. 1. Распределение площадей пустырей и заброшенных промышленных районов (%) по административным округам Москвы

Fig. 1. Distribution of vacant lots and abandoned industrial areas (%) by administrative districts of the city of Moscow

осуществлялась в программе SAS Planet. Первым этапом работы было деление территории Москвы на округа и районы, затем установление границ каждого района. Вторым этапом работы было определение правового режима земельных участков и территорий в каждом районе. При анализе территорий источником информации служили: Публичная кадастровая карта, Яндекс Карты, данные Федеральной службы государственной статистики, а также натурные обследования некоторых объектов [14–16].

Полученные данные по административным округам представлены на рис. 1. Максимальная площадь пустырей и заброшенных промышленных районов находится в ТАО и составила около 1438,8 км². Минимальная площадь пустырей наблюдается в СВАО и составляет около 31,6 км². По процентному соотношению площади пустырей и заброшенных промышленных районов к общей площади административного округа можно выделить следующие категории:

- 1) отсутствие пустырей и брошенных промышленных районов — ЦАО;
- 2) площадь пустырей меньше 1 % — СВАО, ВАО, ЮАО, ТиHАО;
- 3) площадь пустырей от 1,1 до 2 % — СЗАО, ЮВАО, ЗАО;
- 4) площадь пустырей свыше 2, 1 % — ЮЗАО, ТАО.

Результаты и обсуждение

По расчетам авторов общая площадь пустырей и заброшенных промышленных районов на территории города составила около 3227,9 га. Такие заброшенные земельные участки появились в результате промышленного роста, технологических

изменений, закрытия старых заводов, к ним можно также отнести заброшенные месторождения, водоочистные сооружения, не используемые сельскохозяйственные поля и др. Эти территории представляют собой земли, поврежденные предыдущей промышленной или иной застройкой и их невозможно использовать в градостроительстве. Это земли с физическими и/или экологическими ограничениями, они фактически являются заброшенными и недостаточно используемыми или недооцененными участками по сравнению с другими типами пустующих земель. В основном, это постиндустриальные объекты, которые, как правило, являются результатом промышленного роста и упадка, изменения политики зонирования или отказа от старых элементов инфраструктуры. Очень часто заброшенный постиндустриальный объект оказывается сильно загрязненным промышленным или иным развитием, и его невозможно использовать повторно без рекультивации. На таких территориях произрастают единичные деревья, недостаточно оптимальных мест для посадки растений, большое количество непроницаемых покрытий и зданий. Однако современные фитотехнологии, облегчающие восстановление почв городских пустырей, становятся все более доступными. Многие из постиндустриальных объектов уже рекультивированы.

Современные методы рекультивации включают выемку грунта, химическую и термическую обработку, а также сжигание [17–19]. Однако такие методы сопряжены с высокими эксплуатационными расходами, негативно влияют на биологическое плодородие почвы для нового использования, не подходят для очистки грунта на больших площадях. В последнее время все больший интерес с точки зрения экологической устойчивости вызывают альтернативные методы, так как почва является невозобновляемым ресурсом. Фитотехнологии с использованием микроорганизмов или растений, включают экологически чистые методы восстановления. Можно выделить фиторемедиацию как экологически безопасную и экономически эффективную практику, особенно в городских районах, где загрязняющие вещества присутствуют в относительно низких концентрациях [20]. Более того, фиторемедиация на городских и пригородных участках может быть использована на относительно короткий срок. Эти два аспекта — экологический и оптимальные сроки рекультивации достаточно уникальны для городских и пригородных районов, делают фиторемедиацию особенно привлекательным методом [21]. В основу технологических решений проекта карбоновой фермы были выбраны быстрорастущие клоны и сорта из родов *Populus sp.* и *Salix sp.*, которые наиболее изучены как древесные культуры

и фитоэкстракторы [22, 23]. Двухлетний эксперимент с использованием карбоновой фермы с коротким севооборотом (Short rotation woody crops (SRC)) на городском участке, загрязненном цинком, провели в г. Турине, Итальянская Республика [24]. После деиндустриализации металлургической промышленности обширные территории предприятий были заброшены. Большая часть бывших промышленных территорий была отведена под зеленую инфраструктуру, такую как парки и другие типы общественных пространств. Однако восстановление зеленых зон столкнулось с проблемой загрязнения почвы. На наиболее загрязненных участках применялись классические методы рекультивации, оставляя умеренно загрязненные участки. Почва территории, выбранной для карбоновой фермы, была загрязнена тяжелыми металлами, превышающими ПДК для зеленых и жилых зон по итальянскому законодательству. Для посадок использовались девять древесных видов с быстрым ростом и большим производством биомассы: клоны *Populus sp.*, *Salix sp.* и *Robinia sp.* Карбоновая ферма SRC оказалась экономичным и эффективным решением для управления загрязненными городскими территориями Турина, сочетающим производство биомассы и преимущества ландшафта.

В нашем проекте для преодоления негативных факторов влияния на рост растений был выбран тип карбоновой фермы с коротким севооборотом (SRC) [25], поскольку она оказывает наибольший положительный эффект на деградированные почвы, уменьшая количество загрязняющих веществ [26]. Древесные быстрорастущие породы выращиваются для получения высоких урожаев биомассы за короткий период времени (2...10 лет) и секвестрации углерода в тканях растений. Предложенная концепция для рекультивации пустырей и брошенных промышленных районов включает в себя разработку устойчивой и экологичной технологии фиторемедиации с использованием древесных растений при различной плотности посадки, микробиологических организмов, почвенных добавок, с внесением бактериальных удобрений, биоугля, наряду со снижением затрат на складирование отходов и получением экосистемных услуг. В долгосрочной перспективе такие технологии должны решить проблемы загрязнения окружающей среды в Москве. Стратегией проекта предусматриваются исследования по производству биомассы, содействие природным биогеохимическим циклам, восстановление биоразнообразия мест обитания и видов, создание многолетнего углеродного пула.

Для фиторемедиации загрязняющих почвы веществ были выбраны 30 устойчивых в городе и быстрорастущих видов древесных растений,



Рис. 2. Выращивание гибридных тополей по типу SRC, Институт лесной генетики Иоганна Генриха фон Тюннена (ФРГ)

Fig. 2. Cultivation of hybrid poplars by SRC type, Johann Heinrich von Thunen Institute of Forest Genetics (FRG)



Рис. 3. Выращивание ивы по типу SRC, Институт лесной генетики Иоганна Генриха фон Тюннена (ФРГ)

Fig. 3. Cultivation of willow by SRC type, Johann Heinrich von Thunen Institute of Forest Genetics (Germany)

предотвращающих миграцию почвенных загрязнителей в результате ветровой и водной эрозии, выщелачивание и рассеивание почв, содержание в них стабилизирующих металлов (например, меди, свинца) путем их поглощения и накопления корнями, адсорбцию корневой системой или осаждение в ризосфере. Тополь и ива (рис. 2, 3) используются для фиторемедиации в целях очистки почвы от тяжелых металлов или опасных органических соединений. Многие выбранные древесные виды не являются гипераккумуляторами опасных загрязнителей, однако предложенные агротехнические методы управления SRC обеспечат их быстрый рост и повышенную секвестрацию атмосферного углерода. Почвенные добавки микоризных грибов повысят стрессоустойчивость древесных пород, обеспечат корни макроэлементами



Рис. 4. Плантация гледичии. Институт лесной генетики Иоганна Генриха фон Тюннена (ФРГ)

Fig. 4. Gleditsiya plantation. Johann Heinrich von Thunen Institute of Forest Genetics (FRG)



Рис. 5. Плантация тополя (трехлетние побеги на многолетних корнях) и накопление углерода в верхнем слое почвы. Институт лесной генетики Иоганна Генриха фон Тюннена (ФРГ)

Fig. 5. Poplar plantation (3-year-old shoots on perennial roots) and accumulation of C in the upper soil layer. Johann Heinrich von Thunen Institute of Forest Genetics (FRG)

и будут способствовать поглощению воды. Робиния и гледичия (рис. 4) выбраны для улучшения почвы благодаря своей способности создавать симбиотические взаимодействия с азотфиксирующими бактериями [27–32]. Чередование культур с гледичией и робинией обеспечит некоторые преимущества для фитоэкстракционных и фитостабилизирующих древесных культур, например ивы и тополя. Урожай древесины можно будет собирать через короткий промежуток времени — всего 2–3 года, поэтому древесные растения выращиваются как поросль (см. рис. 4). Предлагаются для выращивания и другие древесные виды природной флоры Московского региона (рис. 5). Средняя плотность посадки на коммерческих плантациях SRC составляет до 13 000 черенков на 1 га. Более плотные посадки — до 25 000 растений на 1 га — показывают, что текущие методы управления должны осуществляться с максимальными затратами в целях повышения продуктивности карбоновой фермы. Высокая плотность посадки приводит к снижению производства биомассы, более высокому риску заболеваний вследствие возможного распространения болезней и вредителей.

В данный проект также включен быстрорастущий древесный вид — павловния войлочная (*Paulownia tomentosa* (Thunb.) Steud., 1841), которая встречается в озеленении многих городов мира и Москве в качестве декоративного вида (рис. 6). Павловния входит в число самых быстрорастущих деревьев на планете. В 2015 г. культура Павловния была внесена в Реестр селекционных достижений, допущенных к использованию на территории России. Род Павловния *Paulownia sp.* естественно произрастает в КНР. Наилучшие условия для выращивания гибридов павловнии находятся в Южной Европе, в странах Ближнего Востока, Турции и Ирана, где климатические условия произрастания оказывают положительное влияние на ее динамику роста. За последние 20 лет исследования по выращиванию павловнии проводились в странах Азии, США, Австралии, странах Европы, Центральной Африки [33]. Павловния войлочная признана инвазивным видом в Австрии, поэтому только некоторые ее гибриды были допущены к промышленному выращиванию. Урожайность сухой биомассы на второй год выращивания саженцев изменяется от 1,5 до 14 т на 1 га в зависимости от условий произрастания. На плантациях павловнии для производства биомассы высаживают 2000...3300 растений на 1 га, для производства древесины 550...750 деревьев на 1 га, для получения круглого леса гибриды павловнии выращиваются короткими, 6–10-летними циклами; для биомассы эти циклы могут быть еще короче.



а



б

Рис. 6. Использование павлонии войлочной в озеленении городов: а — Париж, Люксембургский сад; б — Москва, пл. Цезаря Куникова

Fig. 6. The use of Paulownia felt in urban landscaping: а — Paris; б — Moscow

Павлония выращивается в целях производства древесной биомассы для энергетической и целлюлозной промышленности, создания древесных пластиков и композитов, биополимеров, производства древесно-стружечных плит, изготовления мебели, фанеры, бумаги, изделий ручной резьбы [34]. Основными ограничениями, значительно снижающими рост саженцев и производство биомассы, являются более корот-



Рис. 7. Сбор урожая с тополей, щепа используется для производства энергии. Институт лесной генетики Иоганна Генриха фон Тюннена (ФРГ)

Fig. 7. Harvesting from poplars, wood chips are used for energy production. Johann Heinrich von Thunen Institute of Forest Genetics (FRG)

кий вегетационный период, а также весенние и осенние заморозки.

Предложенный проект карбоновой фермы для Москвы должен функционировать как жизненно важная природная система, поддерживать продуктивность растений и животных, улучшать качество воды и воздуха, способствовать получению экосистемных услуг в результате биологических процессов, возникающих в результате сложных взаимодействий в природе.

Создание карбоновой фермы с использованием многих видов древесных растений влияет на ее экологическую многофункциональность. Лиственные древесные растения карбоновой фермы обеспечивают устойчивый источник производства биомассы (рис. 7) [35–37], которая может быть использована для получения биопродуктов, производства биоэнергии, создания древесно-стружечных плит и др. [38].

Биоразнообразие растений и животных зависит от возраста плантации. Условия обитания видов будут зависеть от пространственной структуры, плотности насаждений, количества древесных видов, тенистости крон и влажности воздуха и почвы. Большинство сообществ птиц и млекопитающих SRC состоят из видов, встречающихся на открытой местности и в лесах данного региона.

Выводы

Климатический проект по созданию карбоновой фермы основан на изменении землепользования на пустырях и брошенных промышленных районах в Москве. Предполагается восстановление деградированных земель, а создание ландшафта биологических коридоров обеспечит экосистемные услуги для региона, в том числе смягчение последствий изменения климата, уве-

личение поглощения диоксида углерода, улучшение взаимосвязанности лесных экосистем, расширение среды обитания и сохранение флоры и фауны в пределах Московского региона. Проект разработан в соответствии с требованиями, критериями и показателями, установленным Правилами верификации результатов реализации климатических проектов [39], окажет положительное воздействие на сохранение биоразнообразия в пределах проектной зоны и ее окрестностей. Биоразнообразие будет изменяться в зависимости от возраста древостоя с учетом применения методов управления карбоновой фермой и формирования устойчивости создаваемых экосистем. Различные подходы к измерению биоразнообразия и полученные данные можно использовать в моделях оптимизации и оценки экосистемных услуг.

Реализация данного проекта позволит разработать научно-обоснованные принципы создания карбоновой фермы на пустырях и заброшенных промышленных землях для повышенной секвестрации атмосферного углерода в условиях Московского региона.

Список литературы

- [1] Global assessment of soil pollution – Summary for policy makers. Rome, FAO/ FAO and UNEP. 2021. URL: <https://www.fao.org/3/cb4827en/cb4827en.pdf> (дата обращения 06.04.2023).
- [2] Scholes R., Montanarella L., Brainich A., Barger N., Ten Brink B., Cantele M., Erasmus B. Summary for policy-makers of the assessment report on land degradation and restoration of the Intergovernmental Science Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Bonn, Germany: IPBES secretariat, 2018, 44 p.
- [3] Borrellia P., Robinsone D.A., Panagos P., Lugatod E., Yangb J.E., Alewella C., Wueppere D. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015–2070), 2020, 8 p. URL: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2001403117> (дата обращения 06.04.2023).
- [4] Кулик К.Н., Рулев А.С., Юферев В.Г. Дистанционно-картографическая оценка деградационных процессов в агроландшафтах юга России // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и Высшее профессиональное образование, 2009. № 4 (16). С. 12–25.
- [5] Постановление Правительства РФ от 10.07.2018 № 800 «О проведении рекультивации и консервации земель» (вместе с «Правилами проведения рекультивации и консервации земель»). 18 с. URL: <https://grn.gov.ru/upload/iblock/81f/Постановление%20Правительства%20РФ%20от%2010.07.2018%20N%20800.pdf> (дата обращения 06.04.2023).
- [6] MGI: powering regional climate action. Combating climate change through collaboration, knowledge exchange and investments in the green economy. URL: <https://www.greeninitiatives.gov.sa/about-mgi/> (дата обращения 06.04.2023).
- [7] Bastian O., Haase D., Grunewald K. Ecosystem properties, potentials and Services – The EPPS conceptual framework and an urban application example // *Ecol. Indic.*, 2012, v. 21, pp. 7–16. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.03.014>
- [8] Buchel S., Frantzeskaki N. Citizens' voice: a case study about perceived ecosystem services by urban park users in Rotterdam, the Netherlands // *Ecosystem Services*, 2015, v. 12, pp. 169–177.
- [9] Koschke L., Furst C., Frank S., Makeschin F. A multi criteria approach for an integrated land-cover-based assessment of ecosystem services provision to support landscape planning // *Ecol. Indic.*, 2012, v. 21, pp. 54–66. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.12.010> Elsevier Ltd
- [10] Экосистемные услуги России: Прототип национального доклада. Т. 1. Услуги наземных экосистем / под ред. Е.Н. Букваревой, Д.Г. Замолотчикова. М.: Изд-во Центра охраны дикой природы, 2016. 148 с.
- [11] Постановление Правительства РФ от 30 апреля 2022 г. № 790 «Об утверждении Правил создания и ведения реестра углеродных единиц, а также проведения операций с углеродными единицами в реестре углеродных единиц», 16 с. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202205050004> (дата обращения 06.04.2023).
- [12] Доклад о состоянии окружающей среды в городе Москве в 2019 году / Под ред. А.О. Кульбачевского. М., 2020. 222 с. URL: <https://www.mos.ru/eco/documents/doklady/view/240948220/> (дата обращения 06.04.2023).
- [13] Cvejić R., Eler R., Pintar M., Železnikar S., Haase D., Kabisc, N., Strohbach M. A typology of urban green spaces, ecosystem services provisioning services and demands. Report D3.1 of the EU-funded Green Surge Project, 2015, 68 p. URL: <https://assets.centralparknyc.org/pdfs> (дата обращения 06.04.2023).
- [14] Публичная кадастровая карта РФ – онлайн версия 2019 года. URL: <https://lk.kartagov.net/> (дата обращения 06.04.2023).
- [15] Карта Москвы. URL: <https://www.moscowmap.ru/karta-moskvy.html> (дата обращения 06.04.2023).
- [16] Москва в цифрах: от переписи к переписи. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/313/document/131933> (дата обращения 06.04.2023).
- [17] Biasioli M., Ajmone-Marsan F. Organic and inorganic diffuse contamination in urban soils: The case of Torino (Italy) // *J. Environ. Monit.*, 2007, v. 9, pp. 862–868.
- [18] Капелькина Л.П., Скорик Ю.И. Нормативные основы рекультивации земель в местах размещения отходов производства и потребления // *Экология урбанизированных территорий*, 2009. № 2. С. 86–80.
- [19] Капелькина Л.П. Рекультивация нарушенных земель в Кузбассе (На примере породных отвалов шахты «Нагорная») // *Региональная экология*, 2013. № 1–2 (34). С. 143–152.
- [20] Masloboev V.A., Evdokimova G.A. Bioremediation of oil product contaminated soils in conditions of North Near-Polar Area // *Proceedings of the MSTU*, 2012, v. 15, no. 2, pp. 357–360.
- [21] Zalesny R.S., Pilipovic A. Growth and Development of Short-Rotation Woody Crops for Rural and Urban Applications // *Forests*, 2022, no. 13, v. 867, 9 p. <https://doi.org/10.3390/f13060867>
- [22] Галиулин Р.В. Кочуров Б.И. Фиторемедиация почв, загрязненных тяжелыми металлами // *Теоретическая и прикладная экология*, 2009. № 4. С. 71–75.
- [23] Yuen S.T.S., Salt M., Sun J. Phytocapping as a sustainable cover for waste containment systems: experience of the A-ACAP study // *Sardinia 2011: Proceedings of the Thirteenth Int. Waste Management and Landfill Symp., held in Sardinia, Italy, 3–7 October, 2011*, pp.1–8. <https://hdl.handle.net/2440/71789>.

- [24] Padoan E., Passarella I., Prati M., Bergante S., Facciotto G., Ajmone-Marsan F. The Suitability of Short Rotation Coppice Crops for Phytoremediation of Urban Soils // *Appl. Sci.*, 2020, no. 10(1), p. 307. <https://doi.org/10.3390/app10010307>
- [25] Courchesne F., Turmel M.C., Cloutier-Hurteau B. Phytoextraction of soil trace elements by willow during a phytoremediation trial in Southern Québec, Canada // *Int. J. Phytoremediation*, 2017, v. 19, pp. 545–554.
- [26] Ghezeheia S.B., Ghezeheia S.B., Wrightb J. Matching site-suitable poplars to rotation length for optimized productivity // *Forest Ecology and Management*, 2020, no. 457, v. 117670, 9 p.
- [27] Евдокимова Г.А. Почвенная микробиота как фактор устойчивости почв к загрязнению // *Теоретическая и прикладная экология*, 2014. № 2. С. 17–24.
- [28] Тимофеева С.С., Ульрих Д.В. Технологии фиторемедиации на техногенно-поврежденных территориях в условиях Восточной Сибири и Южного Урала // *Безопасность в техносфере*, 2016. № 6. С. 16–23.
- [29] Арабский А.К., Башкин В.Н., Галиулин Р.В. Инновационная технология рекультивации почв, реализуемая на Тазовском полуострове (Ямало-Ненецкий автономный округ) // *Безопасность труда в промышленности*, 2018. № 3. С. 68–72.
- [30] Башкин В.Н., Галиулин Р.В. Рекультивация нарушенных почв на Тазовском полуострове // *Жизнь Земли*, 2020. № 42(2). С. 153–159.
- [31] Чернышенко О.В. Экологические аспекты применения современных фитотехнологий в городе // Сборник материалов XX Междунар. научно-практического форума «Проблемы озеленения крупных городов». Сборник материалов форума в рамках Международной выставки «Цветы–2018», 2018. С. 48–51.
- [32] Жданов А.С., Волкова Л.П., Чернышенко О.В. Оценка потенциала территории ПККО «Сокольники» в депонировании углерода // *Научные основы устойчивого управления лесами. Материалы IV Всерос. науч. конф. с междунар. участием*. М.: ЦЭПЛ РАН, 2020. С. 32–34.
- [33] Jakubowski M. Cultivation Potential and Uses of Paulownia Wood: A Review // *Forests*, 2022, no. 13, v. 668, 15 p.
- [34] Spirchez C., Japalela V., Lunguleasa A., and Buduroi D. Analysis of briquettes and pellets obtained from two types of Paulownia (*Paulownia tomentosa* and *Paulownia elongata*) sawdust // *BioResources*, 2021, v. 16(3), pp. 5083–5096.
- [35] Vanbeveren S.P.P., Ceulemans R. Biodiversity in short-rotation coppice // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, v. 111, pp. 34–43.
- [36] Фролова В.А., Чернышенко О.В. Потенциальные преимущества деревьев-интродуцентов для поддержания экосистемных услуг в городе // *Труды по интродукции и акклиматизации растений*. Ижевск: Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН, 2021. С. 534–537.
- [37] Васильев С.Б., Чернышенко О.В. К вопросу формирования банка данных о запасах углерода в фитомассе древесных растений // *Сб. науч. тр. ГНБС*, 2018. Т. 147. С. 27–28.
- [38] Dumitrascu A.-E., Lunguleasa A., Salca E.-A., Ciobanu V.D. Evaluation of Selected Properties of Oriented Strand Boards Made from Fast Growing Wood Species // *BioResources*, 2019, v. 15(1), pp. 199–210.
- [39] ГОСТ Р ИСО 14064-3-2021 Национальный стандарт Российской Федерации Газы парниковые. Ч. 3. Требования и руководство по валидации и верификации заявлений в отношении парниковых газов URL: <https://docs.cntd.ru/document/726720621?ysclid=ls94nly-uzk215988104> (дата обращения 06.04.2023).

Сведения об авторах

Фролова Вера Алексеевна — канд. с.-х. наук, доцент, начальник отдела по работе с резидентами Управления постоянных экспозиций Департамента музейно-выставочной, образовательной и экскурсионной деятельности КП ВДНХ, frolova.v@vdnh.ru

Чернышенко Оксана Васильевна [✉] — д-р биол. наук, профессор кафедры ландшафтной архитектуры и садово-паркового строительства ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), tchernyuchenko@mgul.ac.ru

Поступила в редакцию 10.04.2023.

Одобрено после рецензирования 12.01.2024.

Принята к публикации 07.02.2024.

FAST-GROWING PLANTATIONS AS PHYTOREMEDIATION OF DEGRADED LANDS AND THEIR ECOSYSTEM SERVICES

V.A. Frolova¹, O.V. Chernyshenko²✉

¹The joint venture of the city of Moscow «Exhibition of achievements of the national economy» (KP VDNH), 119, build. 230, Mira av., 129223, Moscow, Russia

²BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

tchernyshenko@mgul.ac.ru

Experts on validation and verification of reporting on greenhouse gas emissions and uptake of Bauman Moscow State Technical University (National Research University) began to develop a climate project in 2022. A solid waste landfill Joint-stock Company «VTZ» was selected for the design. The purpose of the work is to create a concept of a climate project for the organization of a carbon farm and a technology for highly efficient sequestration of carbon dioxide from the atmosphere in the arid climate of the steppe zone. The research was carried out on an area of about 5 hectares. Experimental sites with boundary markings were selected, as well as control sites for the baseline scenario, and a reconnaissance survey was conducted. The data of the complex analysis of the territory formed the basis of technological solutions for carbon farm models. We have chosen a type of carbon farm with a short crop rotation Short rotation woody crops (SRC) in order to improve plant growth in extreme growing conditions. The proposed concept includes the development of sustainable and environmentally friendly phytoremediation technology using woody plants, various planting densities, microbiological organisms, soil additives, the introduction of bacterial fertilizers, bio-coal, irrigation schemes, reducing waste storage costs, providing ecosystem services. Research will be carried out on the production of biomass, the promotion of the natural biogeochemical cycle, the restoration of biodiversity — habitats and species, the creation of a multi-year carbon pool. The implementation of the project will make it possible to develop scientifically sound principles for the creation of a carbon farm on landfills of solid industrial waste for increased sequestration of atmospheric carbon in the arid climate of the steppe zone.

Keywords: land degradation, climate project, ecosystem services, biodiversity

Suggested citation: Frolova V.A., Chernyshenko O.V. *Integratsiya kontseptsii ekosistemnykh uslug v gorodskoe planirovanie bystrorastushchikh zelenykh nasazhdeniy* [Fast-growing plantations as phytoremediation of degraded lands and their ecosystem services]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 2, pp. 34–44. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-34-44

Reference

- [1] Global assessment of soil pollution – Summary for policy makers. Rome, FAO/ FAO and UNEP, 2021. Available at: <https://www.fao.org/3/cb4827en/cb4827en.pdf>. (accessed 06.04.2023).
- [2] Scholes R., Montanarella L., Brainich A., Barger N., Ten Brink B., Cantele M., Erasmus B. Summary for policymakers of the assessment report on land degradation and restoration of the Intergovernmental Science Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Bonn, Germany: IPBES secretariat, 2018, 44 p.
- [3] Borrellia P., Robinson D.A., Panagos P., Lugatod E., Yangb J.E., Alewella C., Wueppere D. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015–2070), 2020, 8 p. Available at: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2001403117> (accessed 06.04.2023).
- [6] MGI: powering regional climate action. Combating climate change through collaboration, knowledge exchange and investments in the green economy. Available at: <https://www.greeninitiatives.gov.sa/about-mgi/> (accessed 06.04.2023).
- [4] Kulik K.H., Rulev A.C., Yuferev V.G. *Distantionno-kartograficheskaya otsenka degradatsionnykh protsessov v agrolandshaftakh yuga Rossii* [Remote-cartographic assessment of degradation processes in agricultural landscapes of southern Russia]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i Vysshee professional'noe obrazovanie* [News of the Nizhnevolzhsky Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education], 2009, no. 4 (16), pp. 12–25.
- [5] *Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 10.07.2018 № 800 «O provedenii rekul'tivatsii i konservatsii zemel'» (vmeste s «Pravilami provedeniya rekul'tivatsii i konservatsii zemel'»)* [Decree of the Government of the Russian Federation dated July 10, 2018, no. 800 «On land reclamation and conservation» (together with the «Rules for land reclamation and conservation»)], 18 p. Available at: <https://rpn.gov.ru/upload/iblock/81f/Resolution%20of%20the%20Government%20of%20the%20RF%20from%2010.07.2018%20№%20800.pdf> (accessed 04/06/2023).
- [7] Bastian O., Haase D., Grunewald K. Ecosystem properties, potentials and Services – The EPPS conceptual framework and an urban application example. *Ecol. Indic*, 2012, v. 21, pp. 7–16. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.03.014>
- [8] Buchel S., Frantzeskaki N. Citizens' voice: a case study about perceived ecosystem services by urban park users in Rotterdam, the Netherlands. *Ecosystem Services*, 2015, v. 12, pp. 169–177.
- [9] Koschke L., Furst C., Frank S., Makeschin F. A multi criteria approach for an integrated land-cover-based assessment of ecosystem provision services to support landscape planning. *Ecol. Indic*, 2012, v. 21, pp. 54–66. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.12.010> Elsevier Ltd
- [10] *Ekosistemnye uslugi Rossii: Prototip natsional'nogo doklada. T. 1. Uslugi nazemnykh ekosistem* [Ecosystem services of Russia: Prototype of a national report. T. 1. Terrestrial ecosystem services]. Eds. E.N. Bukvareva, D.G. Zamolodchikov. Moscow: Publishing house of the Center for Wildlife Conservation, 2016, 148 p.
- [11] *Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 30 aprelya 2022 g. № 790 «Ob utverzhdenii Pravil sozdaniya i vedeniya reestra uglerodnykh edinits, a takzhe provedeniya operatsiy s uglerodnymi edinitsami v reestre uglerodnykh edinits»* [Decree of the Government of the Russian Federation of April 30, 2022 No. 790 «On approval of the Rules for creating and maintaining a register

- of carbon units, as well as conducting transactions with carbon units in the register of carbon units», 16 p. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202205050004> (accessed 06.04.2023).
- [12] *Doklad o sostoyanii okruzhayushchey sredy v gorode Moskve v 2019 godu* [Report on the state of the environment in Moscow in 2019]. Ed. A.O. Kulbachevsky. Moscow, 2020, 222 p. Available at: <https://www.mos.ru/eco/documents/doklady/view/240948220/> (accessed 06.04.2023).
- [13] Cvejić R., Eler R., Pintar M., Železnikar S., Haase D., Kabisc, N., Strohbach M. A typology of urban green spaces, ecosystem services provisioning services and demands. Report D3.1 of the EU-funded Green Surge Project, 2015, 68 p. Available at: <https://assets.centralparknyc.org/pdfs> (accessed 06.04.2023).
- [14] *Publichnaya kadaastrovaya karta RF – onlayn versiya 2019 goda* [Public cadastral map of the Russian Federation – online version 2019]. Available at: <https://lk.kartagov.net/> (access date 04/06/2023).
- [15] *Karta Moskvy* [Map of Moscow]. Available at: <https://www.moscowmap.ru/karta-moskvy.html> (accessed 06.04.2023).
- [16] *Moskva v tsifrah: ot perepisi k perepisi* [Moscow in numbers: from census to census]. Available at: <https://rosstat.gov.ru/folder/313/document/131933> (accessed 06.04.2023).
- [17] Biasioli M., Ajmone-Marsan F. Organic and inorganic diffuse contamination in urban soils: The case of Torino (Italy). *J. Environ. Monit.*, 2007, v. 9, pp. 862–868.
- [18] Kapel'kina L.P., Skorik Yu.I. *Normativnye osnovy rekul'tivatsii zemel' v mestakh razmeshcheniya otkhodov proizvodstva i potrebleniya* [Regulatory framework for land reclamation in places where production and consumption waste is disposed]. *Ekologiya urbanizirovannykh territoriy* [Ecology of urbanized territories], 2009, no. 2, pp. 86–80.
- [19] Kapel'kina L.P. *Rekul'tivatsiya narushennykh zemel' v Kuzbasse (Na primere porodnykh otvalov shakhty «Nagornaya»)* [Reclamation of disturbed lands in Kuzbass (On the example of rock dumps of the Nagornaya mine)]. *Regional'naya ekologiya* [Regional ecology], 2013, no. 1–2 (34), pp. 143–152.
- [20] Masloboev V.A., Evdokimova G.A. Bioremediation of oil product contaminated soils in conditions of North Near-Polar Area. *Proceedings of the MSTU*, 2012, v. 15, no. 2, pp. 357–360.
- [21] Zalesny R.S., Pilipovic A. Growth and Development of Short-Rotation Woody Crops for Rural and Urban Applications. *Forests*, 2022, no. 13, v. 867, 9 p. <https://doi.org/10.3390/f13060867>
- [22] Galiulin R.V., Kochurov B.I. *Fitoremediatsiya pochv, zagryaznennykh tyazhelymi metallami* [Phytoremediation of soils contaminated with heavy metals]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* [Theoretical and Applied Ecology], 2009, no. 4, pp. 71–75.
- [23] Yuen S.T.S., Salt M., Sun J. Phytocapping as a sustainable cover for waste containment systems: experience of the A-ACAP study. Sardinia 2011: Proceedings of the Thirteenth Int. Waste Management and Landfill Symp., held in Sardinia, Italy, 3–7 October, 2011, pp. 1–8. <https://hdl.handle.net/2440/71789>.
- [24] Padoan E., Passarella L., Prati M., Bergante S., Facciotto G., Ajmone-Marsan F. The Suitability of Short Rotation Coppice Crops for Phytoremediation of Urban Soils. *Appl. Sci.*, 2020, no. 10(1), p. 307. <https://doi.org/10.3390/app10010307>
- [25] Courchesne F., Turmel M.C., Cloutier-Hurteau B. Phytoextraction of soil trace elements by willow during a phytoremediation trial in Southern Québec, Canada. *Int. J. Phytoremediation*, 2017, v. 19, pp. 545–554.
- [26] Ghezeheia S.B., Ghezeheia S.B., Wrightb J. Matching site-suitable poplars to rotation length for optimized productivity. *Forest Ecology and Management*, 2020, no. 457, v. 117670, 9 p.
- [27] Evdokimova G.A. *Pochvennaya mikrobiota kak faktor ustoychivosti pochv k zagryazneniyu* [Soil microbiota as a factor of soil resistance to pollution]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* [Theoretical and Applied Ecology], 2014, no. 2, pp. 17–24.
- [28] Timofeeva S.S., Ul'rikh D.V. *Tekhnologii fitoremediatsii na tekhnogenno-povrezhdennykh territoriyakh v usloviyakh Vostochnoy Sibiri i Yuzhnogo Urala* [Phytoremediation technologies in technogenically damaged areas in the conditions of Eastern Siberia and the Southern Urals]. *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in the technosphere], 2016, no. 6, pp. 16–23.
- [29] Arabskiy A.K., Bashkin V.N., Galiulin R.V. *Innovatsionnaya tekhnologiya rekul'tivatsii pochv, realizuemaya na Tazovskom poluostrove (Yamalo-Nenetskiy avtonomnyy okrug)* [Innovative technology for soil reclamation, implemented on the Tazovsky Peninsula (Yamalo-Nenets Autonomous Okrug)]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti* [Labor safety in industry], 2018, no. 3, pp. 68–72.
- [30] Bashkin V.N., Galiulin R.V. *Rekul'tivatsiya narushennykh pochv na Tazovskom poluostrove* [Reclamation of disturbed soils on the Tazovsky Peninsula]. *Zhizn' Zemli* [Life of the Earth], 2020, no. 42(2), pp. 153–159.
- [31] Chernyshenko O.V. *Ekologicheskie aspekty primeneniya sovremennykh fitotekhnologiy v gorode* [Environmental aspects of the use of modern phytotechnologies in the city]. *Sbornik materialov XX Mezhdunar. nauchno-prakticheskogo foruma «Problemy ozeleneniya krupnykh gorodov»*. *Sbornik materialov foruma v ramkakh Mezhdunarodnoy vystavki «Tsvety–2018»* [Collection of materials of the XX International. scientific and practical forum «Problems of landscaping in large cities». Collection of forum materials within the framework of the International Exhibition «Flowers-2018»], 2018, pp. 48–51.
- [32] Zhdanov A.S., Volkova L.P., Chernyshenko O.V. *Otsenka potentsiala territorii PKiO «Sokol'niki» v deponirovaniy ugleroda* [Assessment of the potential of the territory of the Sokolniki Park for carbon sequestration]. *Nauchnye osnovy ustoychivogo upravleniya lesami. Materialy IV Vseros. nauch. konf.s mezhdunar. uchastiem* [Scientific foundations of sustainable forest management. Materials IV All-Russian. scientific conf.s int. participation]. Moscow: Cepl RAS, 2020, pp. 32–34.
- [33] Jakubowski M. Cultivation Potential and Uses of Paulownia Wood: A Review. *Forests*, 2022, no. 13, v. 668, 15 p.
- [34] Spirchez C., Japalela V., Lunguleasa A., and Buduroi D. Analysis of briquettes and pellets obtained from two types of Paulownia (*Paulownia tomentosa* and *Paulownia elongata*) sawdust. *BioResources*, 2021, v. 16(3), pp. 5083–5096.
- [35] Vanbeveren S.P.P., Ceulemans R. Biodiversity in short-rotation coppice. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, v. 111, pp. 34–43.
- [36] Frolova V.A., Chernyshenko O.V. *Potentsial'nye preimushchestva derev'ev-introdutsentov dlya podderzhaniya ekosistemnykh uslug v gorode* [Potential benefits of introduced trees for maintaining ecosystem services in the city]. *Trudy po introduktsii i akklimatizatsii rasteniy* [Proceedings on the introduction and acclimatization of plants]. Izhevsk: Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2021, pp. 534–537.

- [37] Vasil'ev S.B., Chernyshenko O.V. *K voprosu formirovaniya banka dannykh o zapasakh ugleroda v fitomasse drevesnykh rasteniy* [On the issue of forming a data bank on carbon reserves in the phytomass of woody plants]. Sb. nauch. tr. GNBS [Coll. scientific tr. GNBS], 2018, t. 147, pp. 27–28.
- [38] Dumitrascu A.-E., Lunguleasa A., Salca E.-A., Ciobanu V.D. Evaluation of Selected Properties of Oriented Strand Boards Made from Fast Growing Wood Species. *BioResources*, 2019, v. 15(1), pp. 199–210.
- [39] GOST R ISO 14064-3-2021 *Natsional'nyy standart Rossiyskoy Federatsii Gazy parnikovyye. Ch. 3. Trebovaniya i rukovodstvo po validatsii i verifikatsii zayavleniy v otnoshenii parnikovyykh gazov* [National standard of the Russian Federation Greenhouse gases. Part 3. Requirements and guidance for validation and verification of statements regarding greenhouse gases]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/726720621?ysclid=ls94nlyuzk215988104> (accessed 06.04.2023).

Authors' information

Frolova Vera Alekseevna — Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor, State-owned enterprise VDNH, frolova.v@vdnh.ru

Chernyshenko Oksana Vasil'evna ✉ — Dr. Sci. (Biology), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), tchernyshenko@mgul.ac.ru

Received 10.04.2023.

Approved after review 12.01.2024.

Accepted for publication 07.02.2024.

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

ДИНАМИКА СЕЗОННОГО ПРИРОСТА ПОБЕГОВ СОСНЫ КАЛАБРИЙСКОЙ *PINUS BRUTIA* VAR. *PITYUSA* (STEVEN) SILBA В ГОРНОМ КРЫМУ

Н.А. Макаров, В.П. Коба✉

ФГБУН «Ордена Трудового Красного знамени Никитский ботанический сад — Национальный научный центр РАН»,
298648, Республика Крым, г. Ялта, п. Никита, Никитский спуск, д. 52

kobavp@mail.ru

Представлены материалы изучения биометрических показателей побегов в естественных древостоях *Pinus brutia* var. *pityusa* в Горном Крыму. Выполнен анализ специфики их сезонного прироста в соответствии с динамикой условий произрастания. Установлены изменения сезонного прироста побегов в зависимости от орографических условий и режима увлажнения. Зафиксировано снижение сезонного прироста побегов преимущественно в насаждениях прибрежной зоны — в западной части ареала сосны калабрийской *P. brutia* var. *pityusa*, в урочище Аязьма, в годы с недостаточным количеством осадков. Выявлена пролонгация действия засухи на интенсивность прироста в древостоях прибрежной зоны урочища Батилиман и в верхней части урочища Аязьма в первый год постзасушливого периода. Определено, что в настоящее время по показателям величины сезонного прироста побегов наиболее жесткие условия произрастания *P. brutia* var. *pityusa* сформировались на г. Караул-Оба. В западной части ареала, в урочище Батилиман, обнаружено увеличение изменчивости сезонного прироста побегов вследствие повышения уровня флуктуации климатических факторов. Показано, что такая ситуация отражает негативные тенденции снижения жизненного потенциала насаждений сосны калабрийской *P. brutia* var. *pityusa* на г. Караул-Оба и в урочище Батилиман. Сделан вывод, что в условиях глобальных изменений природной среды снижение стабильности сезонного прироста побегов может усилить деструктивные процессы в насаждениях сосны *P. brutia* var. *pityusa* в пределах перечисленных территорий.

Ключевые слова: древостои, побеги, прирост, динамика, условия произрастания

Ссылка для цитирования: Макаров Н.А., Коба В.П. Динамика сезонного прироста побегов сосны калабрийской *Pinus brutia* var. *pityusa* (Steven) Silba в Горном Крыму // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 2. С. 45–54. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-45-54

Сосна калабрийская *Pinus brutia* var. *pityusa* (Steven) Silba относится к кайнозойским реликтам и имеет крайне ограниченный ареал. В настоящее время естественные насаждения сохранились на Черноморском побережье Кавказа от Анапы до Пицунды, в Крыму — в западной части ареала в районе урочищ Аязьма и Батилиман, в восточной части в урочище Новый Свет [1–6]. В 2010–2020-е годы в связи с усилением антропогенного воздействия на крымские ландшафты обострилась проблема сохранения указанных реликтовых насаждений. Несмотря на предпринимаемые меры по усилению их охраны, даже на заповедных территориях деструктивные явления полностью исключить не удастся. В связи с этим актуальной проблемой охраны *P. brutia* var. *pityusa* является формирование базы специфических биологических данных по этому виду, в том числе анализ жизненного потенциала в зависимости от динамики условий произрастания [7–12].

В системе взаимодействия растение — внешняя среда анализ особенностей роста вегетатив-

ных органов имеет важное значение, в частности при оценке текущего состояния и перспектив развития как отдельных растений, так и всего растительного сообщества. В связи с этим при мониторинге лесных насаждений одной из первоочередных задач является изучение динамики роста вегетативных органов в целях оценки влияния внешних факторов на их биометрические показатели [13–21].

Цель работы

Цель работы — изучение биометрических показателей побегов сосны калабрийской *P. brutia* var. *pityusa* в естественных древостоях Горного Крыма, анализ особенностей их сезонного прироста в зависимости от динамики условий произрастания.

Объект и методы исследований

Работы по изучению сезонного прироста побегов сосны калабрийской *P. brutia* var. *pityusa* проводили в естественных насаждениях Горного Крыма. С помощью методов лесной таксации [22] были заложены пробные площади по четырем гипсометрическим профилям в западной части

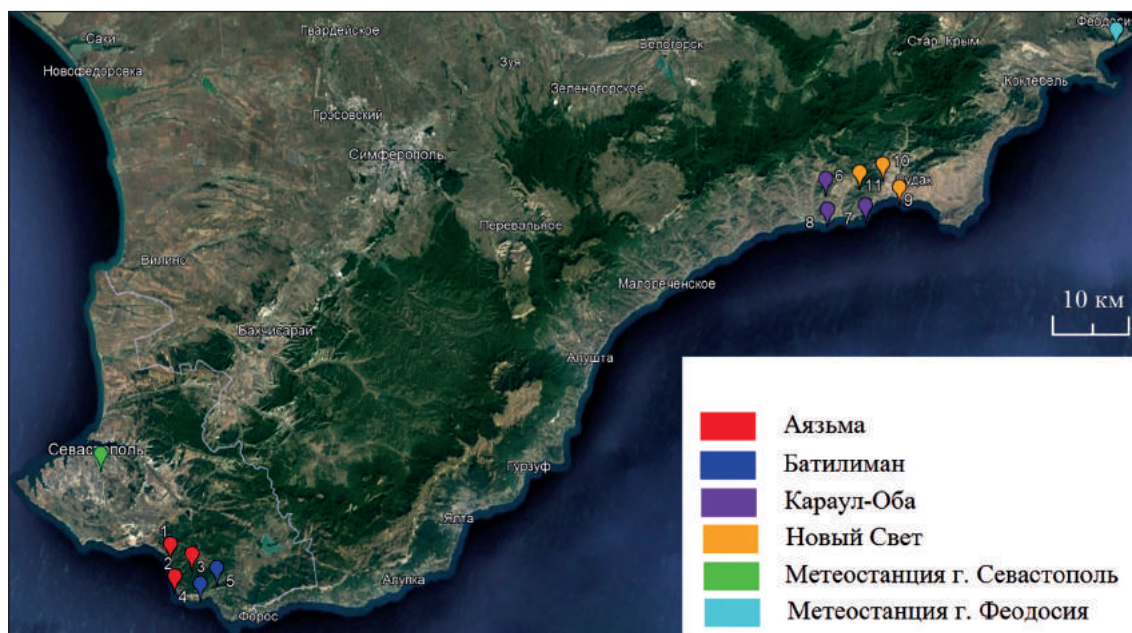


Рис. 1. Схема расположения пробных площадей в естественных насаждениях сосны калабрийской *P. brutia* var. *pityusa* в Горном Крыму

Fig. 1. Scheme of trial plots in natural plantations of Calabrian pine *P. brutia* var. *pityusa* in the Crimean Mountain

южного макросклона Главной гряды Крымских гор на мысе Айя, в урочищах Аязьма и Батилиман, и в восточной — на г. Караул-Оба и в урочище Новый Свет (рис. 1). В урочище Аязьма пробные площади заложены на высоте 50, 180, и 290 м н. у. м., в Батилимане — 50 и 120 м н. у. м., на г. Караул-Оба — 40, 70 и 120 м н. у. м., в урочище Новый Свет — 50, 100 и 140 м н. у. м. Все пробные площади юго-восточной экспозиции с крутизной склонов 10...15°.

В период с 2019 по 2022 гг. на пробных площадях изучали динамику биометрических показателей побегов сосны калабрийской *P. brutia* var. *pityusa*. В осенний период в средней части кроны с южной стороны у трех модельных деревьев на каждой пробной площади измеряли сезонный прирост 10 побегов. Погодные условия анализировали с помощью данных метеорологических станций г. Севастополя и г. Феодосии [23]. Количественные результаты наблюдений были обработаны с использованием методов вариационной статистики [24].

Результаты и обсуждение

Изучение сезонного прироста побегов в природных популяциях исследуемой сосны *P. brutia* var. *pityusa* в Горном Крыму показало, что он существенно изменяется в зависимости от орographic особенностей и режима увлажнения. В западной части ареала *P. brutia* var. *pityusa*, в урочище Аязьма, в годы с невысоким количеством осадков (в 2019 г. выпало 369 мм, 2020 г. — 272 мм, при среднегодовой норме для Севасто-

польского района 426 мм) наблюдалось снижение сезонного прироста наряду с увеличением его различий в зависимости от местопроизрастания древостоев. Наиболее значительные изменения сезонного прироста побегов наблюдались в прибрежной зоне по сравнению с центральной частью массива сосновых лесов сосны *P. brutia* var. *pityusa* в урочище Аязьма. В 2019 г. среднее значение прироста побегов на высоте 50 м н. у. м. составило $28,3 \pm 2,7$ мм, на высоте 180 м н. у. м. этот показатель увеличился до $37,6 \pm 3,1$ мм. В 2020 г. эти различия несколько выровнялись — на высоте 50 м н. у. м. среднее значение прироста побегов составило $26,1 \pm 2,2$ мм, на высоте 180 м н. у. м. — $33,4 \pm 2,1$ мм. Очевидно, это связано с ухудшением в 2020 г. условий произрастания по степени увлажнения (табл. 1).

В последствии количество осадков увеличилось, в частности в 2021 г. в Севастопольском районе их выпало 482 мм, что превысило показатель 2020 г. на 210 мм (рис. 2). Повышение увлажнения в 2021 г. и 2022 г. повлияло на увеличение сезонного прироста побегов и снижение различий в приросте в зависимости от высоты местопроизрастания. В верхней части распространения сосны *P. brutia* var. *pityusa*, в урочище Аязьма, сезонный прирост побегов отличался более стабильными значениями по годам. Средние показатели изменялись в пределах 30,1...34,3 мм, что связано с некоторым увеличением количества осадков с высотой местопроизрастания над уровнем моря [25, 26]. Не исключается также дополнительное поступление влаги в почву при выпа-

Т а б л и ц а 1

**Сезонный прирост побегов сосны калабрийской *P. brutia* var. *pityusa* в Горном Крыму
за период наблюдения 2019–2022 гг.**

**Seasonal growth of Calabrian pine *P. brutia* var. *pityusa* shoots in the Crimean Mountain
for the observation period 2019-2022**

| Год | Высота, м н. у. м. | Сумма осадков, мм | | Сумма темпера- тур за январь — июль, °С | Прирост | |
|-------------------|-----------------------|-------------------------|---------------|---|----------------|---------|
| | | осень — зима — весна | январь — июль | | $L \pm l$, мм | V , % |
| Аязьма | | | | | | |
| 2019 | 50 | 336 | 190 | 2150 | 28,3 ± 2,7 | 23,9 |
| | 180 | | | | 37,6 ± 3,1 | 24,1 |
| | 290 | | | | 32,2 ± 3,0 | 26,1 |
| 2020 | 50 | 311 | 119 | 2148 | 26,1 ± 2,2 | 18,5 |
| | 180 | | | | 33,4 ± 2,1 | 13,7 |
| | 290 | | | | 32,9 ± 3,3 | 21,8 |
| 2021 | 50 | 185 | 259 | 2102 | 34,8 ± 2,6 | 22,4 |
| | 180 | | | | 32,1 ± 2,7 | 21,9 |
| | 290 | | | | 30,1 ± 3,0 | 22,0 |
| 2022 | 50 | 302 | 235 | 2249 | 43,3 ± 4,3 | 22,4 |
| | 180 | | | | 48,4 ± 5,4 | 24,8 |
| | 290 | | | | 34,3 ± 4,0 | 29,1 |
| Батилиман | | | | | | |
| 2019 | 50 | 336 | 190 | 2150 | 31,3 ± 3,1 | 28,8 |
| | 120 | | | | 36,7 ± 3,1 | 31,5 |
| 2020 | 50 | 311 | 119 | 2148 | 23,7 ± 2,2 | 27,6 |
| | 120 | | | | 24,9 ± 2,3 | 26,5 |
| 2021 | 50 | 185 | 259 | 2102 | 21,7 ± 2,1 | 23,4 |
| | 120 | | | | 24,4 ± 2,3 | 25,4 |
| 2022 | 50 | 302 | 235 | 2249 | 37,8 ± 3,3 | 26,4 |
| | 120 | | | | 32,1 ± 3,1 | 21,7 |
| Караул-Оба | | | | | | |
| 2019 | 40 | 306 | 276 | 2236 | 20,3 ± 1,8 | 28,2 |
| | 70 | | | | 21,8 ± 1,9 | 23,3 |
| | 120 | | | | 18,9 ± 1,4 | 23,1 |
| 2020 | 40 | 274 | 297 | 2237 | 18,6 ± 1,2 | 25,4 |
| | 70 | | | | 21,6 ± 1,8 | 26,5 |
| | 120 | | | | 17,4 ± 1,2 | 22,6 |
| 2021 | 40 | 159 | 125 | 2254 | 19,5 ± 1,4 | 24,5 |
| | 70 | | | | 17,7 ± 1,4 | 25,7 |
| | 120 | | | | 15,2 ± 1,2 | 24,3 |
| 2022 | 40 | 475 | 252 | 2365 | 24,3 ± 1,9 | 25,4 |
| | 70 | | | | 21,5 ± 1,4 | 19,8 |
| | 120 | | | | 19,9 ± 1,3 | 23,1 |
| Новый Свет | | | | | | |
| 2019 | 50 | 306 | 276 | 2236 | 61,2 ± 1,7 | 24,7 |
| | 100 | | | | 40,9 ± 1,9 | 14,6 |
| | 150 | | | | 37,9 ± 1,4 | 12,4 |
| 2020 | 50 | 274 | 297 | 2237 | 45,5 ± 1,5 | 10,3 |
| | 100 | | | | 38,8 ± 1,3 | 10,6 |
| | 150 | | | | 38,5 ± 1,7 | 14,2 |
| 2021 | 50 | 156 | 125 | 2254 | 44,8 ± 1,3 | 9,8 |
| | 100 | | | | 38,5 ± 1,7 | 14,3 |
| | 150 | | | | 37,8 ± 1,3 | 10,6 |
| 2022 | 50 | 475 | 252 | 2365 | 40,2 ± 2,0 | 15,2 |
| | 100 | | | | 36,8 ± 1,5 | 12,5 |
| | 150 | | | | 40,9 ± 1,9 | 14,5 |

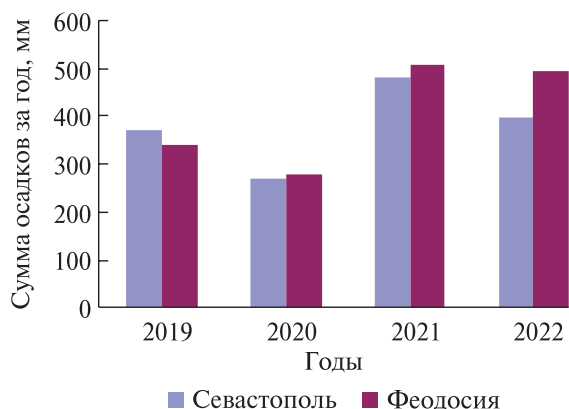


Рис. 2. Годовая сумма осадков в районах проведения исследований

Fig. 2. Annual sum of precipitation in the study areas

Т а б л и ц а 2

Влияние погодных условий на сезонный прирост побегов сосны калабрийской *P. brutia* var. *pityusa* в местах произрастания, в зависимости от высоты над уровнем моря
Influence of weather conditions on seasonal of Calabrian pine *P. brutia* var. *pityusa* shoot growth in the growth sites, depending on the altitude above sea level

| Высота, м н. у. м. | Сумма осадков, мм | | Сумма температур за январь — июль, °С |
|--------------------|----------------------|---------------|---------------------------------------|
| | осень — зима — весна | январь — июль | |
| Аязьма | | | |
| 50 | -0,27 | 0,75 | 0,66 |
| 180 | 0,42 | 0,29 | 0,97 |
| 290 | 0,75 | -0,33 | 0,92 |
| Батилиман | | | |
| 50 | 0,58 | 0,21 | 0,91 |
| 120 | 0,66 | 0,08 | 0,46 |
| Караул-Оба | | | |
| 40 | 0,86 | 0,49 | 0,95 |
| 70 | 0,71 | -0,64 | 0,16 |
| 120 | 0,94 | -0,16 | 0,57 |
| Новый Свет | | | |
| 50 | -0,21 | -0,23 | -0,62 |
| 100 | -0,44 | -0,35 | -0,81 |
| 150 | 0,89 | 0,18 | 0,95 |

дении росы, которое на высоте 300...400 м н. у. м. усиливается в связи с возрастанием вертикального температурного градиента, особенно в теплый период года [27, 28].

С помощью корреляционного анализа была проведена оценка влияния погодных условий на сезонный прирост побегов сосны калабрийской *P. brutia* var. *pityusa* (табл. 2). Сумма атмосферных осадков за период осени — зимы — весны существенно влияет на прирост побегов сосны в сред-

ней и в верхней частях массива сосновых лесов в урочище Аязьма. Очевидно, это связано с формированием резерва почвенной влаги в осенне-зимний период, когда в западной части Горного Крыма выпадает около 48 % среднегодового объема атмосферных осадков. В прибрежной зоне, где большая часть рельефа представлена склонами высокой крутизны с уклоном 45...50°, переход поверхностного стока в грунтовый происходит менее эффективно, что снижает возможность накопления влаги в почве в холодный сезон. Здесь в большей степени на рост побегов оказывают осадки первой половины года, коэффициент корреляции составляет 0,75. Температурный режим начала вегетационного периода также оказывает существенное влияние на рост побегов *P. brutia* var. *pityusa* в урочище Аязьма, преимущественно в средней части массива ее лесов.

В насаждениях урочища Батилиман по сравнению с насаждениями урочища Аязьма в 2019 г. сезонная динамика прироста побегов сосны калабрийской *P. brutia* var. *pityusa* достаточно близка. В 2020 г. вследствие уменьшения количества осадков прирост побегов заметно снизился. В 2021 г., несмотря на улучшение условий произрастания вследствие увеличения увлажнения, в насаждениях урочища Батилиман отмечалось дальнейшее снижение сезонного прироста побегов, причем в большей степени в древостоях прибрежной зоны. И только в 2022 г. увеличился сезонный прирост побегов, его средние показатели в некотором приближении достигли значений, которые наблюдались в этот период в урочище Аязьма.

В урочище Батилиман крутизна склонов на месте произрастания сосны калабрийской *P. brutia* var. *pityusa* сравнительно невелика, в среднем 10...15°, что повышает вероятность перехода поверхностного стока в грунтовый и увеличивает возможность накопления почвенной влаги при выпадении атмосферных осадков. В то же время в ландшафтной структуре урочища Батилиман преобладают склоны южной экспозиции — 92 %, что способствует увеличению интенсивности испарения выпадающих осадков с поверхности почвы, особенно в весенне-летние месяцы. Это определяет слабое влияние осадков периода январь — июль на динамику роста побегов сосны *P. brutia* var. *pityusa* в насаждениях урочища Батилиман. Влияние температурного режима на рост побегов в наибольшей степени появляется в насаждениях прибрежной зоны урочища Батилиман. Микроклимат урочища Батилиман формируется под значительным влиянием крутых склонов восточной части мыса Айя. Высота скального массива здесь достигает 630 м н. у. м., он закрывает с севера сравнительно узкую полосу насаждений

сосны, что сглаживает динамику температурного фона. При этом морские туманы, снижая температуру в прибрежной зоне, могут влиять на рост побегов в начале вегетационного периода.

Таким образом, в пределах западных территорий Горного Крыма зависимость роста сосны *P. brutia* var. *pityusa* от степени увлажнения достаточно четко выражена, особенно в прибрежной зоне. В наибольшей степени это проявляется в насаждениях урочища Балитиман, где влияние засухи имеет пролонгирующий характер, что, очевидно, связано с активным иссушением почвы в засушливые годы и слабой водоудерживающей способностью подстилающего каменисто-щебенчатого грунта. В этих условиях влагонасыщение корнеобитаемого почвенного слоя древесных растений происходит медленно, даже при увеличении количества выпадающих осадков. Подобная ситуация наблюдается и в насаждении сосны калабрийской *P. brutia* var. *pityusa* урочища Аязьма вследствие ухудшения структуры почвы в связи с увеличением в ней каменисто-щебенчатой фракции как результата интенсификации эрозионных процессов на крутых склонах, примыкающих к скалистым обрывам [29, 30].

В восточной части ареала *P. brutia* var. *pityusa* в Горном Крыму у сезонного прироста побегов — существенно иная изменчивость. В частности, на г. Караул-Оба прирост наименьший, особенно на высоте 120 м н. у. м. В 2021 г. в среднем он составил $15,2 \pm 1,2$ мм — самое низкое значение для всех изучаемых насаждений. На г. Караул-Оба выявлена некоторая специфика сезонного прироста сосны *P. brutia* var. *pityusa* — в прибрежной зоне он выше по сравнению с верхними участками распространения насаждений. Очевидно, в верхней части г. Караул-Оба в условиях высокой эродированности склонов, практически полного отсутствия почвенного покрова и усиления ветрового режима происходит активное иссушение грунта, особенно на южных склонах [1]. В прибрежной зоне в условиях действия увлажненного воздуха, поступающего с морскими бризами, интенсивность данного процесса снижается. Это в той или иной степени оказывает положительное влияние на улучшение условий произрастания в прибрежной зоне по характеристике увлажнения почвы. В насаждениях г. Караул-Оба также отмечается снижение интенсивности прироста побегов, поскольку большая часть атмосферных осадков испаряется или стекает с поверхности склонов при сильных ливнях, слабо насыщая влагой глубинные слои грунта. В насаждениях г. Караул-Оба возможности роста сосны калабрийской *P. brutia* var. *pityusa* в наибольшей степени определяются количеством осадков за период осень — зима — весна.

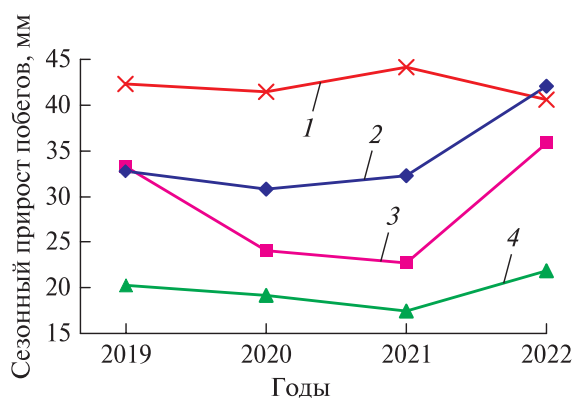


Рис. 3. Сезонный прирост побегов сосны калабрийской *P. brutia* var. *pityusa* в насаждениях Горного Крыма: 1 — урочище Новый Свет; 2 — урочище Аязьма; 3 — урочище Батилиман; 4 — г. Караул-Оба

Fig. 3. Seasonal growth of Calabrian pine *P. brutia* var. *pityusa* shoots in plantations of the Crimean Mountain: 1 — Novy Svet tract; 2 — Ayazma tract; 3 — Batiliman tract; 4 — Karaul-Oba

При этом усиление зависимости сезонного прироста от данного фактора наблюдается в прибрежных насаждениях и верхних участках г. Караул-Оба. Атмосферные осадки периода январь — июль не оказывают существенного влияния на динамику прироста побегов. Температурный режим на г. Караул-Оба так же, как и в урочище Батилиман, наиболее существенно влияет на сезонный прирост побегов древостоев сосны *P. brutia* var. *pityusa* прибрежной зоны, что наиболее вероятно связано с влиянием морских туманов в весенний период.

В урочище Новый Свет в период проведения исследований зафиксированы наиболее высокие показатели сезонного прироста побегов сосны калабрийской *P. brutia* var. *pityusa*. В 2019 г. на высоте 50 м н. у. м. его среднее значение было почти в два раза выше аналогичных величин для урочища Аязьма и Батилиман. Снижение сезонного прироста побегов в насаждениях урочища Новый Свет отмечено на высоте 100 м н. у. м. в 2022 г. В этот год в целом на всех высотных поясах произошло снижение интенсивности прироста побегов. Это может быть связано с расположением основного массива насаждений сосны *P. brutia* var. *pityusa* урочища Новый Свет в котловине гор, окружающей данную территорию. Здесь в условиях относительно замкнутого пространства усиливается формирование локального микроклимата, который может заметно влиять на температурный режим и, соответственно, на динамику увлажнения почвы. В условиях котловины не исключается также специфическое распределение подземного стока и формирования грунтовых вод. Очевидно, поэтому на большей части территории урочища Новый Свет сезонный прирост побегов сосны

P. brutia var. *pityusa* наименее связан с влиянием погодных условий. Только в верхней части горного склона урочища Новый Свет количество выпадающих осадков за период осень — зима — весна и температурный режим первой половины вегетационного периода в той или иной степени оказывают влияние на сезонный прирост побегов сосны калабрийской *P. brutia* var. *pityusa*.

Анализируя в целом интегральные характеристики сезонного прироста побегов сосны калабрийской *P. brutia* var. *pityusa* в Горном Крыму, следует отметить, что в период проведения исследований наиболее высокие показатели прироста побегов наблюдались в насаждениях урочища Новый Свет (рис. 3), наиболее жесткие условия произрастания сформировались на г. Караул-Оба. В западной части ареала сосны калабрийской, в урочище Батилиман, изменчивость сезонного прироста побегов увеличивается вследствие флуктуации погодных условий. Это отрицательно сказывается на жизненном потенциале насаждений сосны *P. brutia* var. *pityusa* в пределах г. Караул-Оба и урочища Батилиман. В условиях глобальных изменений природной среды, связанных с потеплением климата, которое проявляется и в Горном Крыму [31], снижение стабильности сезонного прироста побегов может определить усиление деструктивных процессов в насаждениях сосны калабрийской *P. brutia* var. *pityusa* в пределах г. Караул-Оба и урочища Батилиман.

Выводы

Сезонный прирост побегов сосны калабрийской *P. brutia* var. *pityusa* в насаждениях Горного Крыма заметно варьирует в зависимости от орграфических и погодными условий. В западной части ареала, в урочище Аязьма, в годы с невысоким количеством осадков сезонный прирост побегов снижается преимущественно в насаждениях прибрежной зоны. Сходная ситуация наблюдается в древостоях урочища Батилиман. Засуха оказывает пролонгирующее действие на интенсивность прироста побегов в древостоях прибрежной зоны урочища Батилиман и в верхней части урочища Аязьма в первый год после засушливого периода. Наиболее жесткие условия для произрастания сосны калабрийской *P. brutia* var. *pityusa* сформировались на г. Караул-Оба. В западной части ареала сосны в Горном Крыму, в урочище Батилиман, изменчивость сезонного прироста побегов увеличивается вследствие повышения уровня флуктуации погодных условий. Эта ситуация отражает негативные тенденции снижения жизненного потенциала насаждений сосны калабрийской *P. brutia* var. *pityusa* в пределах г. Караул-Оба и урочища Батилиман. В условиях глобальных изменений природной среды снижение активности

роста побегов отражает усиление негативных тенденций ухудшения состояния в насаждениях *P. brutia* var. *pityusa* на данных территориях.

Список литературы

- [1] Коба В.П., Коренькова О.О., Макаров Н.А. Погодные условия и фенология вылета пыльцы *Pinus brutia* var. *pityusa* (Steven) Silba // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада, 2022. № 145. С. 83–88.
- [2] Плугатарь Ю.В. Леса Крыма. Симферополь: Ариал, 2015. 385 с.
- [3] Исиков В.П., Трикоз Н.Н. О причинах усыхания сосны крымской и сосны пицундской в Крыму в 2020 году // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада, 2021. № 138. С. 50–56. DOI: 10.36305/0513-1634-2021-138-50-56
- [4] Клименко Н.И., Плугатарь Ю.В., Клименко О.Е., Клименко Н.Н. *Pinus brutia* Ten. var. *pityusa* (Steven) Silba в условиях западного степного причерноморского района Крыма // Промышленная ботаника, 2021. Т. 21. № 2. С. 75–80.
- [5] Каширина Е.С., Голубева Е.И. Концепция организации системы рекреационного мониторинга на Большой севастопольской тропе // Системы контроля окружающей среды, 2018. № 14(34). С. 70–74. DOI 10.33075/2220-5861-2018-4-70-74
- [6] The plant list. URL: <http://www.theplantlist.org/tpl1.1/record/kew-2563110> (дата обращения 10.01.2023).
- [7] Попович А.В. Фитосоциологическая значимость и флористическое разнообразие памятника природы «Роша сосны пицундской» (Джанхотский бор) // Вестник Краснодарского регионального отделения Русского географического общества, 2021. Вып. 11. С. 220–229.
- [8] Постарнак Ю.А. Воздействие рекреационной деятельности на сообщества сосны пицундской // Курортно-рекреационный комплекс в системе регионального развития: инновационные подходы, 2012. № 1. С. 227–232.
- [9] Джангиров М.Ю. Особенности изменения ареала прибрежных фитоценозов сосны пицундской Кавказского побережья Черного моря // Социально-экономические проблемы развития курортов России: Сб. науч. трудов, Сочи, 23–24 апреля 2015 года. Сочи: Изд-во Сочинского научно-исследовательского центра РАН, 2015. С. 129.
- [10] Джангиров М.Ю. Об изолированной юго-восточной популяции сосны пицундской (*Pinus pityusa* Steven) на территории Российской Федерации // Социально-экономические проблемы развития курортов России: Сб. науч. тр., Сочи, 25 апреля 2013 года. Сочи: Изд-во Сочинского научно-исследовательского центра РАН, 2013. С. 147–150.
- [11] Анненкова И.В. Прогноз изменения условий произрастания сосны пицундской на основе климатических моделей // Устойчивое развитие особо охраняемых природных территорий: Сб. статей IX Всерос. (нац.) науч.-практ. конф., Сочи, 06–08 октября 2022 г. Сочи: Донской издательский центр, 2022. С. 27–31.
- [12] Крыленко С.В., Алейникова А.М., Крыленко В.В. Естественное восстановление прибрежных растительных сообществ сосны пицундской после лесных пожаров // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности, 2015. № 2. С. 26–32.
- [13] Коренькова О.О. Особенности сезонного роста побегов крымской популяции *Juniperus deltoides* R.P. Adams // Вестник Нижневартковского государственного университета, 2022. № 4(60). С. 33–42. DOI: 10.36906/2311-4444/22-4/04

- [14] Горышина Т.К. Экология растений. М.: Высшая школа, 1979. 368 с.
- [15] Донец Е.В. Особенности влияния режима осадков на годичный прирост сосны обыкновенной в условиях юго-западной части Крапивинского нефтяного месторождения // Омский научный вестник, 2014. № 1(128). С. 149–151.
- [16] Al Farsi Kh.A.A.Y., Lupton D., Hitchmough J.D., Cameron R.W.F. How fast can conifers climb mountains? Investigating the effects of a changing climate on the viability of *Juniperus seravschanica* within the mountains of Oman, and developing a conservation strategy for this tree species // *J. of Arid Environments*, 2017, v. 147, pp. 40–53. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2017.07.020
- [17] Yousefi S., Avand M., Yariyan P. Identification of the most suitable afforestation sites by *Juniperus excelsa* specie using machine learning models: Firuzkuh semi-arid region, Iran // *Ecological Informatics*, 2021, v. 65, p. 101427. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2021.101427
- [18] Плугатарь Ю.В., Коренькова О.О., Коба В.П. Сезонный рост побегов *Juniperus excelsa* М.-Bieb. в Горном Крыму // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада, 2022. № 143. С. 64–71. DOI 10.36305/0513-1634-2022-143-64-71
- [19] Сергеева К.А. Физиологические и биохимические основы зимостойкости древесных растений. М.: Наука, 1971. 174 с.
- [20] Шиманюк А.П. Дендрология. М.: Лесн. пром-сть, 1967. 334 с.
- [21] Farjon A. A Handbook of the World's Conifers. Brill: Leiden & Boston, 2017, 1154 p.
- [22] Анучин Н.П. Лесная таксация. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 512 с.
- [23] Погода в мире. URL: <https://rp5.ru> (дата обращения 10.01.2023).
- [24] Лакин Г.Ф. Биометрия. М.: Высш. школа, 1990. 350 с.
- [25] Bardelli T., Gómez-Brandón M., Ascher-Jenull J., Fornasier F., Arfaioli P., Francioli D., Egli M., Sartori G., Insam H., Pietramellara G. Effects of slope exposure on soil physico-chemical and microbiological properties along an altitudinal climosequence in the Italian Alps // *Science of The Total Environment*, 2017, v. 575, pp. 1041–1055. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.09.176
- [26] Bardelli T., Ascher-Jenull J., Stocker E.B., Fornasier F., Arfaioli P., Fravolini G., Roberta L., Medeiros A., Egli M., Pietramellara G., Insam H., Gómez-Brandón M. Impact of slope exposure on chemical and microbiological properties of Norway spruce deadwood and underlying soil during early stages of decomposition in the Italian Alps // *CATENA*, 2018, v. 167, pp. 100–115. DOI: 10.1016/j.catena.2018.04.031
- [27] Соколова Г.Г. Влияние высоты местности, экспозиции и крутизны склона на особенности пространственного распределения растений // *Acta Biologica Sibirica*, 2016. № 3. С. 34–45.
- [28] Пинской В.Н., Идрисов И.А., Каширская Н.Н., Ельцов М.В., Потапов А.В., Борисов А.В. Влияние экспозиции склона на химические и биологические свойства почв земледельческих террас Восточного Кавказа // *Аридные экосистемы*, 2022. Т. 28. № 2(91). С. 113–121. DOI: 10.24412/1993-3916-2022-2-113-121
- [29] Плугатарь Ю.В., Коба В.П., Папельбу В.В., Новицкий М.Л., Макаров Н.А. Некоторые свойства почв и типологическая структура насаждений *Pinus pityusa* (Pinaceae) Горного Крыма // *Земледелие*, 2021. № 7. С. 15–21. DOI: 10.24412/0044-3913-2021-7-15-21
- [30] Плугатарь Ю.В., Коба В.П., Новицкий М.Л., Пшеничников Н.А., Папельбу В.В. Почвенные условия в насаждениях *Arbutus andrachne* L. Южного берега Крыма // *Земледелие*, 2022. № 8. С. 7–12. DOI: 10.24412/0044-3913-2022-8-7-12
- [31] Коба В.П., Жигалова Т.П. Климатические факторы и динамика пожаров в лесах Горного Крыма // *Лесоведение*, 2014. № 2. С. 52–58.

Сведения об авторах

Макаров Никита Александрович — аспирант лаборатории лесоведения, ФГБУН «Ордена Трудового Красного Знамени Никитский ботанический сад — Национальный научный центр РАН», makarov.crimea@yandex.ru

Коба Владимир Петрович — д-р биол. наук, профессор, зав. лабораторией лесоведения, ФГБУН «Ордена Трудового Красного Знамени Никитский ботанический сад — Национальный научный центр РАН», Заслуженный деятель науки и техники Республики Крым, kobavp@mail.ru

Поступила в редакцию 30.05.2023.

Одобрено после рецензирования 18.07.2023.

Принята к публикации 19.12.2023.

PINUS BRUTIA VAR. PITYUSA (STEVEN) SILBA SEASONAL GROWTH DYNAMICS IN CRIMEAN MOUNTAINS

N.A. Makarov, V.P. Koba✉

Nikita Botanical Gardens — National Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 52, Nikitsky descent, 298648, Yalta, Republic of Crimea, Russia

kobavp@mail.ru

In the western and eastern territories, *P. brutia* var. *pityusa* in the Crimean Mountains, four hypsometric profiles were used to establish trial plots. Seasonal growth of shoots was measured on trial plots near model trees. The purpose of the research was to study the biometric parameters of shoots in natural stands of *P. brutia* var. *pityusa* in the Crimean Mountains, analysis of the specifics of their seasonal growth depending on the dynamics of growing conditions. As a result of the research, it was found that the seasonal growth of shoots in plantations of *P. brutia* var. *pityusa* in the Crimean Mountains varies markedly due to the peculiarities of the orographic conditions and the moisture regime. It has been established that in the western part of the distribution of *P. brutia* var. *pityusa*, in the Ayazma tract, in years with low rainfall, the seasonal increase in shoots decreases, to the greatest extent in the plantations of the coastal zone. The prolongation of the drought effect on the growth intensity in the forest stands of the coastal zone of the Batiliman tract and in the upper belt of the Ayazma tract in the first year of the post-drought period was revealed. At present, in terms of the magnitude of seasonal growth of shoots, the most severe conditions for the growth of *P. brutia* var. *pityusa* are formed in Mount Karaul-Oba. In the western part of its distribution in the Crimean Mountains, in the Batiliman tract, an increase in the amplitude of the variability of the seasonal growth of shoots is observed due to an increase in the level of climatic factors fluctuation. It is shown that this situation reflects negative trends in the decline in the life potential of *P. brutia* var. *pityusa* city of Karaul-Oba and the natural boundary of Batiliman. It is concluded that under the conditions of global changes in the natural environment, this can enhance destructive processes in plantations of *P. brutia* var. *pityusa* within the above-mentioned areas.

Keywords: stands, shoots, growth, dynamics, growing conditions

Suggested citation: Makarov N.A., Koba V.P. *Dinamika sezonnogo prirosta pobegov sosny kalabriyskoy Pinus brutia var. pityusa (Steven) Silba v Gornom Krymu [Pinus brutia var. pityusa (Steven) Silba seasonal growth dynamics in Crimean Mountains]*. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2024, vol. 28, no. 2, pp. 45–54.

DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-45-54


References

- [1] Koba V.P., Koren'kova O.O., Makarov N.A. *Pogodnye usloviya i fenologiya vyleta pyl'tsy Pinus brutia var. pityusa (Steven) Silba* [Weather conditions and phenology of pollen emergence of Pinus brutia var. pityusa (Steven) Silba]. Byulleten' Gosudarstvennogo Nikitskogo botanicheskogo sada [Bulletin of the State Nikitsky Botanical Garden], 2022, no. 145, pp. 83–88.
- [2] Plugatar' Yu.V. *Lesnaya Kryma* [Forests of Crimea]. Simferopol: ARIAL, 2015, 385 p.
- [3] Isikov V.P., Trikoz N.N. *O prichinakh usykhaniya sosny krymskoy i sosny pitsundskoy v Krymu v 2020 godu* [On the reasons for the drying out of Crimean pine and Pitsunda pine in Crimea in 2020]. Byulleten' Gosudarstvennogo Nikitskogo botanicheskogo sada [Bulletin of the State Nikitsky Botanical Garden], 2021, no. 138, pp. 50–56. DOI: 10.36305/0513-1634-2021-138-50-56
- [4] Klimentko N.I., Plugatar' Yu.V., Klimentko O.E., Klimentko N.N. *Pinus brutia Ten. var. pityusa (Steven) Silba v usloviyakh zapadnogo stepnogo prichernomorskogo rayona Kryma* [Pinus brutia Ten. var. pityusa (Steven) Silba in the conditions of the western steppe Black Sea region of Crimea]. Promyshlennaya botanika [Industrial Botany], 2021, v. 21, no. 2, pp. 75–80.
- [5] Kashirina E.S., Golubeva E.I. *Kontseptsiya organizatsii sistemy rekreatsionnogo monitoringa na Bol'shoy sevastopol'skoy trope* [Concept of organizing a recreational monitoring system on the Great Sevastopol Trail]. Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy [Environmental Control Systems], 2018, no. 14(34), pp. 70–74. DOI 10.33075/2220-5861-2018-4-70-74
- [6] The plant list. Available at: <http://www.theplantlist.org/tpl1.1/record/kew-2563110> (accessed 10.01.2023).
- [7] Popovich A.V. *Fitosozologicheskaya znachimost' i floristicheskoe raznoobrazie pamyatnika prirody «Roshcha sosny pitsundskoy» (Dzhankhotskiy bor)* [Phytosozological significance and floristic diversity of the natural monument «Pitsunda Pine Grove» (Dzhankhotsky Forest)]. Vestnik Krasnodarskogo regional'nogo otdeleniya Russkogo geograficheskogo obshchestva [Bulletin of the Krasnodar regional branch of the Russian Geographical Society], 2021, v. 11, pp. 220–229.
- [8] Postarnak Yu.A. *Vozdeystvie rekreatsionnoy deyatel'nosti na soobshchestva sosny pitsundskoy* [Impact of recreational activities on Pitsunda pine communities]. Kurortno-rekreatsionnyy kompleks v sisteme regional'nogo razvitiya: innovatsionnye podkhody [Resort and recreational complex in the system of regional development: innovative approaches], 2012, no. 1, pp. 227–232.
- [9] Dzhangirov M.Yu. *Osobennosti izmeneniya areala pribrezhnykh fitosenozov sosny pitsundskoy Kavkazskogo poberezh'ya Chernogo morya* [Features of changes in the area of coastal phytocenoses of Pitsunda pine on the Caucasian coast of the Black Sea]. Sotsial'no-ekonomicheskie problemy razvitiya kurortov Rossii: sb. nauchnykh trudov [Socio-economic problems of the development of resorts in Russia: a collection of scientific Proceedings], Sochi, April 23–24, 2015. Sochi: Federal State Budgetary Institution of Science Sochi Research Center of the Russian Academy of Sciences, 2015, p. 129.
- [10] Dzhangirov M.Yu. *Ob izolirovannoy yugo-vostochnoy populyatsii sosny pitsundskoy (Pinus pityusa Steven) na territorii Rossiyskoy Federatsii* [On the isolated south-eastern population of Pitsunda pine (Pinus pityusa Steven) on the territory of the

- Russian Federation]. *Sotsial'no-ekonomicheskie problemy razvitiya kurortov Rossii: sb. nauchnykh trudov*, Sochi, 25 aprelya 2013 goda [Socio-economic problems of the development of resorts in Russia: collection. scientific works], Sochi, April 25, 2013. Sochi: Federal State Budgetary Institution of Science Sochi Research Center of the Russian Academy of Sciences, 2013, pp. 147–150.
- [11] Annenkova I.V. *Prognoz izmeneniya usloviy proizrastaniya sosny pitsundskoy na osnove klimaticheskikh modeley* [Forecast of changes in the growing conditions of Pitsunda pine based on climate models]. *Ustoychivoe razvitie osobo okhranyaemykh prirodnykh territoriy: sb. statey IX Vserossiyskoy (natsional'noy) nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Sustainable development of specially protected natural territories: collection. articles of the IX All-Russian (national) scientific and practical conference], Sochi, October 06–08, 2022. Sochi: State government institution of the Krasnodar Territory «Natural ornithological park in the Imereti Lowland», Don Publishing Center, 2022, pp. 27–31.
- [12] Krylenko S.V., Aleynikova A.M., Krylenko V.V. *Estestvennoe vosstanovlenie pribrezhnykh rastitel'nykh soobshchestv sosny pitsundskoy posle lesnykh pozharov* [Natural restoration of coastal plant communities of Pitsunda pine after forest fires]. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Bulletin of the Russian Peoples' Friendship University. Series: Ecology and life safety], 2015, no. 2, pp. 26–32.
- [13] Koren'kova O.O. *Osobennosti sezonnogo rosta pobegov krymskoy populyatsii Juniperus deltoides R.P. Adams* [Features of seasonal growth of shoots of the Crimean population of *Juniperus deltoides* R.P. Adams]. *Vestnik Nizhnevartovskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Nizhnevartovsk State University], 2022, no. 4(60), pp. 33–42. DOI: 10.36906/2311-4444/22-4/04
- [14] Goryshina T.K. *Ekologiya rasteniy* [Plant ecology]. Moscow: Higher school, 1979, 368 p.
- [15] Donets E.V. *Osobennosti vliyaniya rezhima osadkov na godichnyy prirost sosny obyknovennoy v usloviyakh yugo-zapadnoy chasti Krapivinskogo neftyanogo mestorozhdeniya* [Features of the influence of precipitation regime on the annual growth of Scots pine in the southwestern part of the Krapivinskoye oil field]. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2014, no. 1(128), pp. 149–151.
- [16] Al Farsi Kh.A.A.Y., Lupton D., Hitchmough J.D., Cameron R.W.F. How fast can conifers climb mountains? Investigating the effects of a changing climate on the viability of *Juniperus seravschanica* within the mountains of Oman, and developing a conservation strategy for this tree species. *J. of Arid Environments*, 2017, v. 147, pp. 40–53. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2017.07.020
- [17] Yousefi S., Avand M., Yariyan P. Identification of the most suitable afforestation sites by *Juniperus excelsa* specie using machine learning models: Firuzkuh semi-arid region, Iran. *Ecological Informatics*, 2021, v. 65, p. 101427. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2021.101427
- [18] Plugatar' Yu.V., Koren'kova O.O., Koba V.P. *Sezonnyy rost pobegov Juniperus excelsa M.-Bieb. v Gornom Krymu* [Seasonal shoot growth of *Juniperus excelsa* M.-Bieb. in the Mountainous Crimea]. *Byulleten' Gosudarstvennogo Nikitskogo botanicheskogo sada* [Bulletin of the State Nikitsky Botanical Garden], 2022, no. 143, pp. 64–71. DOI 10.36305/0513-1634-2022-143-64-71
- [19] Sergeeva K.A. *Fiziologicheskie i biokhimicheskie osnovy zimostoykosti drevesnykh rasteniy* [Physiological and biochemical bases of winter hardiness of woody plants]. Moscow: Nauka, 1971, 174 p.
- [20] Shimanyuk A.P. *Dendrologiya* [Dendrology]. Moscow: Forest industry, 1967, 334 p.
- [21] Farjon A. *A Handbook of the World's Conifers*. Brill: Leiden & Boston, 2017, 1154 p.
- [22] Anuchin N.P. *Lesnaya taksatsiya* [Forest taxation]. Moscow: Lesnaya industry, 1982, 512 p.
- [23] *Pogoda v mire* [Weather in the world]. Available at: <https://tp5.ru> (accessed 01.10.2023).
- [24] Lakin G.F. *Biometriya* [Biometrics]. Moscow: Higher School, 1990, 350 p.
- [25] Bardelli T., Gómez-Brandón M., Ascher-Jenull J., Fornasier F., Arfaioli P., Francioli D., Egli M., Sartori G., Insam H., Pietramellara G. Effects of slope exposure on soil physico-chemical and microbiological properties along an altitudinal climosequence in the Italian Alps. *Science of The Total Environment*, 2017, v. 575, pp. 1041–1055. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.09.176
- [26] Bardelli T., Ascher-Jenull J., Stocker E.B., Fornasier F., Arfaioli P., Fravolini G., Roberta L., Medeiros A., Egli M., Pietramellara G., Insam H., Gómez-Brandón M. Impact of slope exposure on chemical and microbiological properties of Norway spruce deadwood and underlying soil during early stages of decomposition in the Italian Alps. *CATENA*, 2018, v. 167, pp. 100–115. DOI: 10.1016/j.catena.2018.04.031
- [27] Sokolova G.G. *Vliyanie vysoty mestnosti, ekspozitsii i krutizny sklona na osobennosti prostranstvennogo raspredeleniya rasteniy* [The influence of terrain height, exposure and slope steepness on the characteristics of the spatial distribution of plants]. *Acta Biologica Sibirica*, 2016, no. 3, pp. 34–45.
- [28] Pinsky V.N., Idrisov I.A., Kashirskaya N.N., El'tsov M.V., Potapov A.V., Borisov A.V. *Vliyanie ekspozitsii sklona na khimicheskie i biologicheskie svoystva pochv zemledel'cheskikh terras Vostochnogo Kavkaza* [The influence of slope exposure on the chemical and biological properties of soils on agricultural terraces of the Eastern Caucasus]. *Aridnye ekosistemy* [Arid ecosystems], 2022, v. 28, no. 2(91), pp. 113–121. DOI: 10.24412/1993-3916-2022-2-113-121
- [29] Plugatar' Yu.V., Koba V.P., Papel'bu V.V., Novitskiy M.L., Makarov N.A. *Nekotorye svoystva pochv i tipologicheskaya struktura nasazhdeniy Pinus pityusa (Pinaceae) Gornogo Kryma* [Some soil properties and typological structure of *Pinus pityusa* (Pinaceae) plantations in the Crimean Mountains]. *Zemledelie*, 2021, no. 7, pp. 15–21. DOI: 10.24412/0044-3913-2021-7-15-21
- [30] Plugatar' Yu.V., Koba V.P., Novitskiy M.L., Pshenichnikov N.A., Papel'bu V.V. *Pochvennye usloviya v nasazhdeniyakh Arbutus andrachne L. Yuzhnogo berega Kryma* [Soil conditions in plantations of *Arbutus andrachne* L. on the southern coast of Crimea]. *Zemledelie*, 2022, no. 8, pp. 7–12. DOI: 10.24412/0044-3913-2022-8-7-12
- [31] Koba V.P., Zhigalova T.P. *Klimaticheskie faktory i dinamika pozharov v lesakh Gornogo Kryma* [Climatic factors and dynamics of fires in the forests of the Crimean Mountains]. *Lesovedenie*, 2014, no. 2, pp. 52–58.

Authors' information

Makarov Nikita Aleksandrovich — pg. of the Laboratory of Forest Science of the FGBUN «Order of the Red Banner of Labor Nikitsky Botanical Garden — National Scientific Center of the Russian Academy of Sciences», makarov.crimea@yandex.ru

Koba Vladimir Petrovich  — Dr. Sci. (Biology), Professor, Head of the Laboratory of Forest Science of the Order of the Red Banner of Labor Nikitsky Botanical Garden — National Scientific Center of the Russian Academy of Sciences», kobavp@mail.ru

Received 30.05.2023.

Approved after review 18.07.2023.

Accepted for publication 19.12.2023.

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 КОРЫ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ И ШУНГИТОВОЙ КРОШКИ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ ОВСА ПОСЕВНОГО (*AVENA SATIVA* L.) В ЗАКРЫТОМ ГРУНТЕ

Е.Н. Теребова^{1✉}, Н.В. Орешникова², М.А. Павлова¹, А.А. Стародубцева¹

¹ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», Россия, 185910, г. Петрозаводск, ул. Ленина, д. 33

²ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Россия, 119991, Москва, ул. Ленинские горы, д. 1

eterebova@gmail.com

Представлены материалы исследования возможности применения коры сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и шунгитовой крошки для выращивания овса посевного (*Avena sativa* L.) в лабораторном эксперименте в течение 70 сут. Проанализированы ростовые показатели, содержание фотосинтетических пигментов листа (хлорофиллы А, В, каротиноиды), содержание макроэлементов (С, N, P, K, S, Fe, Mg) и микроэлементов (Al, Zn, Cu), рассчитаны коэффициенты биологического поглощения металлов корнями, надземными органами и всем растением овса посевного. Выполнены работы по обогащению грунтов макро- и микроэлементами до оптимальных (Fe, Mg, Mn) и загрязняющих уровней (Cu, Zn, Ni, S), при добавлении шунгита в универсальный грунт (контрольный образец) в концентрациях 10 г/кг отдельно и совместно с корой. Показана стимуляция ростовых процессов растений овса с их последующем замедлением в конце эксперимента при использовании и коры, и шунгита в субстратах. Установлено, что шунгитовые добавки на начальных этапах онтогенеза растений эффективнее стимулировали рост, чем коровые, а кора и шунгит в грунтах не влияли на фотосинтетическую функцию овса. Выявлено накопление растениями в условиях использования в субстратах коры и шунгита Zn, Cu и Mn до нормальных, а Fe, Al и S — до критических уровней содержания. Сделан вывод, что кору сосны обыкновенной можно безопасно и с положительным эффектом оптимизации минерального питания растений применять в агротехнологиях.

Ключевые слова: кора, сосна обыкновенная, шунгит, овес посевной, макро- и микроэлементы, коэффициенты биологического поглощения

Ссылка для цитирования: Теребова Е.Н., Орешникова Н.В., Павлова М.А., Стародубцева А.А. Использование коры сосны обыкновенной и шунгитовой крошки для выращивания овса посевного (*Avena sativa* L.) в закрытом грунте // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 2. С. 55–69.
DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-55-69

Шунгитовая крошка и кора древесных растений представляют собой отходы горно- и деревообрабатывающих производств. Эффективность использования древесины можно повысить с помощью энергосберегающих технологий и комплексного использования получаемых отходов. Проблема все более требует оптимизационного решения и приобретает особую значимость для предприятий, которые в результате переработки древесины получают большой объем отходов в виде коры, опилок и щепы, не имеющих сбыта.

В России в результате деятельности предприятий лесопромышленного комплекса (ЛПК) ежегодно образуется примерно 68...74 млн м³ древесных отходов, и лишь 48...58 % этого объема перерабатывается [1], большая часть коры сжигается [2].

Ученые разных стран осуществляют поиск оптимальных способов использования коры как сырья для химической и фармацевтической промышленности, нужд сельского хозяйства и производства волокнистых полуфабрикатов [3].

В 2010–2020-е годы повысилась интенсивность химической обработки коры, и расширилось получение из нее различных соединений, получило развитие производство на основе коры стружечных, волокнистых и теплоизоляционных плит, композиционных материалов, сырья для очистки воды и газов, что указывает на перспективность ее применения в качестве уникального природного материала и возобновляемого ресурса.

Данные наблюдений свидетельствуют о том, что разложение коры с выделением тепла обуславливает комфортные условия для жизнедеятельности растений, способствуя их развитию и росту. Кора древесных растений содержит около 85 % органических веществ, легкоразлагаемая часть коры стимулирует биологическую активность почвы и служит источником минеральных и органических веществ, используемых растениями в процессе жизнедеятельности [4]. Кора хвойных видов растений проявляет большую устойчивость к микробиологическому разложению, нежели кора лиственных видов растений, и поэтому нуждается в более тонком измельчении и тщательном подборе доз азотсодержащих добавок.

О микробиологических процессах, происходящих в коре при ее хранении, можно судить по изменению соотношения углерода и азота (C:N). Кора хвойных видов растений содержит комплекс веществ, обладающих высокой биологической активностью и представляющих практически все классы органических соединений, которые встречаются в растениях, в частности экстрактивные вещества [5]. В зависимости от вида растения содержание минеральных веществ в коре существенно различается, изменяясь в диапазоне 1...10 %. В золе коры обнаружены такие макроэлементы, как С, N, К, Р, Са, Mg, Fe, и такие микроэлементы, как Al, Mn, Mo, Zn, Cu, В, S, Na, Ni, Cr [6]. В технологиях выращивания растений кора используется для их обогащения элементами (N, P, K), улучшения газо- и водопроницаемости грунтов и субстратов [7].

Шунгитовые породы — природное углерод-содержащее сырье, весьма распространенное. В частности, в Республике Карелия, выявлено месторождение шунгита, уникальное по условиям образования, объему промышленных запасов, строению вещества. Шунгиты характеризуются разнообразными физико-химическими свойствами и направлениями их практического использования. В составе шунгитов насчитывается 62 элемента [8], в том числе макроэлементы — С, К, Са, Mg, Fe и микроэлементы — Na, Al, Cu, Zn, Mo, Mn, Cr, S, необходимые для жизнедеятельности растений. Богатство элементного состава и благоприятные тепловые свойства шунгитовых пород повышают плодородие почв, которые на них сформированы. Такие почвы наиболее устойчивы к антропогенному воздействию вследствие их высоких буферных способностей [9].

Шунгитовые породы можно использовать в металлургии [10]. Они являются эффективными адсорбентами в технологиях очистки воды [11], применяются в качестве активного наполнителя композиционных материалов для придания им новых уникальных качеств: повышенной износостойкости, химической стойкости и электропроводности [12]. Шунгитовые породы обладают радиоэкранирующими свойствами, на их основе получены новые материалы, обеспечивающие защиту человека от техногенных электромагнитных излучений [13]. Перспективная роль шунгита для полезного изменения свойств грунтов и субстратов для выращивания растений предсказывалась издавна. Так, уже в 1940-е годы в Карелии шунгит рассматривался как возможное удобрение [14]. Современные исследования показали положительное влияние шунгита на оптимизацию минерального питания лука репчатого (*Allium cepa* L.) в условиях нарушения водного режима на начальных этапах онтогенеза растений [15]. Шунгит

повышает устойчивость к условиям перезимовки таких растений, как клевер красный (*Trifolium pretense* L), донник белый (*Melilotus albus* Desr), люцерна посевная (*Medicago sativa* L.) [16].

Таким образом, кора древесных растений и шунгит благодаря разнообразному элементному составу могут обогащать грунт для выращивания растений, влиять на минеральный обмен и основные физиологические процессы растительного организма. В то же время кора — ткань древесных растений, которая активно накапливает поллютанты (металлы, оксиды серы и азота), выводя их из процессов жизнедеятельности растения [17, 18], и оптимизированные корой грунты могут загрязняться токсичными элементами до критических значений. Шунгитовые породы содержат *d*-элементы (тяжелые металлы), *f*-элементы (лантаноиды), соединения серы в разных концентрациях [19], которые могут загрязнять почву и воды [20, 21]. Вопрос о влиянии коры и шунгита на развитие растений и депонирование ими элементов до критических значений остается открытым.

Цель работы

Цель работы — оценка роста, развития и накопления элементов овсом посевным (*Avena sativa* L.) в вегетационном эксперименте при выращивании на субстратах с добавлением отходов камне- и деревообработки (шунгит, кора).

Материалы и методы

Объект исследования. Овес посевной (*Avena sativa* L.) — однолетнее травянистое растение высотой 20...150 см с мочковатой корневой системой. Имеет широкий ареал распространения, обитает на всех континентах, за исключением прибрежной зоны Средиземноморья, Северной и Юго-Восточной Азии. Овес влаголюбив, холодостоек. Вегетационный период длится от 70 до 110 сут., в зависимости от условий выращивания. Овес переносит повышенную кислотность почвы, хорошо растет на супесчаных, суглинистых, глинистых и торфяных почвах, отзывчив на удобрения. Используется для лабораторного выращивания при отработке агротехнических технологий.

Схема эксперимента. Овес посевной (*Avena sativa* L.) выращивается в течение 70 сут. до фазы цветения на грунтах с добавлением коры, шунгита в вегетационном эксперименте. В вегетационные сосуды помещали четыре варианта грунта:

1) универсальный грунт (УГ), контрольный образец;

2) универсальный грунт и среднеразмельченная (3...7 мм) трехлетняя кора сосны обыкновенной (УГ+К), в концентрации 10 г/кг;

3) универсальный грунт и шунгитовая крошка (УГ+Ш) Зажогинского месторождения, в концентрации 10 г/кг;

4) универсальный грунт, размельченная кора (в концентрации 10 г/кг) и шунгитовая (УГ+К+Ш) крошка (в концентрации 10 г/кг).

В каждом варианте было пять вегетационных сосудов. Универсальный грунт («Терра Вита») содержал макроэлементы в соотношении N:P:K равном 150:270:300 (мг/л) в виде солей и оксидов K_2SO_4 , Na_2SO_4 , P_2O_5 , K_2O , NH_4NO_3 . Грунт (понятия грунт и субстрат используются как синонимы) был следующего состава: верховой торф различной степени разложения — 70...80 %; биогумус — 10; песок намывной — 5, агроперлит — 6...8 %, мука известняковая (доломитовая), рН солевой 6,0...6,5.

Температура выращивания 20...23 °С, фотосинтетическая активная радиация (ФАР) 220 мкмоль/(м²·с), фотопериод 12 ч и относительная влажность воздуха 50 %. Семена высевали в вегетационные сосуды объемом 500 мл с субстратом, плотность посева составляла 50 растений на один сосуд. Полив осуществляли дистиллированной водой, влажность субстрата поддерживалась на уровне 60...70 %. Шунгитовая крошка была с Зажогинского месторождения (Медвежьегорский район Республики Карелия), на котором добывают высокоуглеродистые шунгитовые породы (табл. 1). Эффективная удельная радиоактивность ($A_{эфф}$) шунгитовой крошки составляла 151 Бк/кг (1 класс безопасности (≤ 370 Бк/кг) в соответствии с СанПиН 2.6.1.2523–09 «Нормы радиационной безопасности»).

Ростовые показатели растений (длину корня, стебля, массу листьев), содержание фотосинтетических пигментов (хлорофилла А, В и каротиноидов в мг/г сырого веса) листа оценивали спектрофотометрическим методом (спектрофотометр Спектр 2001) [22], общее содержание хлорофилла (А+В) в относительных единицах (хлорофилльный индекс) определяли с помощью прибора AtLeaf+, содержание элементов в корнях и надземных органах овса посевного. Элементный состав растений и грунтов определяли на научном оборудовании Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук». Содержание тяжелых металлов определяли атомно-абсорбционным методом на спектрофотометре AA-7000 (Shimadzu, Япония).

В работе представлены средние арифметические значения валового содержания тяжелых металлов в корнях и надземной массе растений после 70 сут. выращивания, а также в исходных грунтах и в грунтах, оставшихся после выращивания растений. Содержание N, K, P, C, S в

Т а б л и ц а 1

Химический состав шунгита Зажогинского месторождения

Chemical composition of shungite
from the Zazhoginskoye deposit

| Вещество | Содержание, % | Вещество | Содержание, % |
|--------------------------------|---------------|--------------------------------|---------------|
| SiO ₂ | 57,0 | TiO ₂ | 0,2 |
| Al ₂ O ₃ | 4,3 | Na ₂ O | 0,2 |
| FeO | 2,8 | S | 1,5 |
| K ₂ O | 1,5 | C | 28,0 |
| MgO | 1,2 | H ₂ O _{кр} | 3,0 |
| CaO | 0,3 | | |

растениях и грунтах определяли по известным методикам [22, 23].

Коэффициент биологического поглощения (КБП) металлов, характеризующий способность растений поглощать металлы из среды, рассчитывали как отношение содержания металла в растении к его содержанию в грунте в конце эксперимента. Грунт отбирали непосредственно в зоне корней растений. Значения КБП металлов рассчитывали в целом растении, корнях и надземных частях — стебле и листьях.

Статистическая обработка данных. Достоверность полученных результатов оценивали с помощью критерия Фишера (Fisher's LSD test) с учетом объема сравниваемых совокупностей и порога доверительной вероятности 0,95 (программа Statgraphics 2.1 для Windows).

Результаты и обсуждение

Анализ ростовой активности растений показал, что длина стебля овса посевного была достоверно выше на 15...30 % по сравнению с контрольным образцом (УГ) во всех вариантах эксперимента: в начале выращивания — на 15...30 сут. и в середине выращивания — на 40-е...50-е сут. При этом максимальные отличия в ростовой активности (45 %) при добавлении коры сосны обыкновенной и шунгита зафиксированы на начальных этапах онтогенеза растений, в частности шунгитовые добавки эффективнее увеличивали длину стебля овса посевного. В конце эксперимента длина стебля была больше только при добавлении коры и шунгита совместно в грунт (УГ+К+Ш), а в остальных вариантах эксперимента рост растений замедлился (рис. 1). Кроме того, в ходе эксперимента измеряли площадь листьев и сырую массу надземных и подземных органов. Отличий по этим показателям выявлено не было. Длина корней растений (см), измеренная в конце эксперимента, составила $19,3 \pm 0,7$ (УГ), $22,9 \pm 0,7$ (УГ+К), $18,1 \pm 1,1$ (УГ+Ш) и $18,9 \pm 0,5$ (У+К+Ш) см, т. е. была максимальной во втором варианте выращивания (с корой).

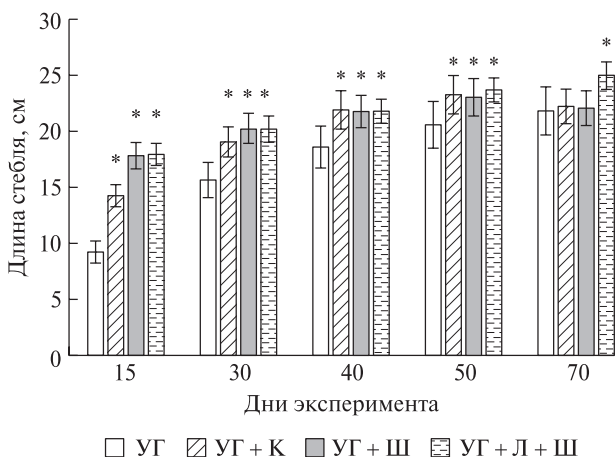


Рис. 1. Изменение длины (см) стебля овса посевного (*Avena sativa* L.) в ходе эксперимента при выращивании на разных вариантах субстрата: УГ — универсальный грунт (контрольный образец), К — кора, Ш — шунгит (звездочкой отмечены значения, достоверно отличающиеся от контрольного образца ($p \leq 0,05$))

Fig. 1. Change in stem length (cm) of sown oats (*Avena sativa* L.) during the experiment when growing on different substrate variants: УГ — universal soil (control sample), К — bark, Ш — shungite (asterisk indicates values significantly different from the control sample ($p \leq 0,05$))

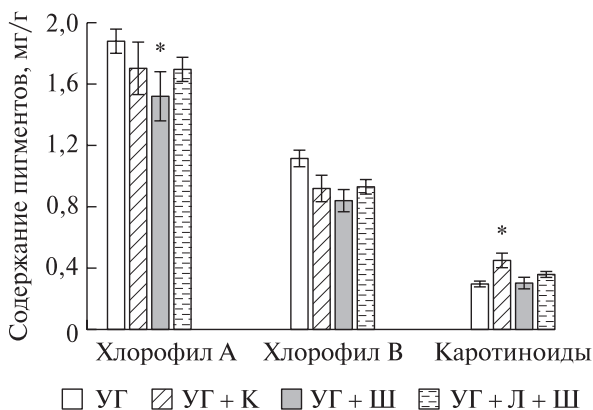


Рис. 2. Содержание хлорофиллов А, В и каротиноидов (мг/г) в листьях овса посевного (*Avena sativa* L.) в конце эксперимента при выращивании на разных вариантах субстрата (усл. обозначения см. рис. 1; звездочкой отмечены значения, достоверно отличающиеся от контрольного образца ($p \leq 0,05$))

Fig. 2. Content of chlorophylls A, B and carotenoids (mg/g) in leaves of sown oats (*Avena sativa* L.) at the end of the experiment when grown on different substrate variants (see Fig. 1; asterisk indicates values significantly different from the control sample ($p \leq 0,05$))

Содержание фотосинтетических пигментов листа растений овса посевного в конце эксперимента (70-е сут.) достоверно не отличалось при добавлении в субстрат коры и шунгита. При этом содержание каротиноидов в листе при выращивании на субстрате с корой увеличилось (рис. 2). У растений не проявились хлороз и некроз листьев во всех условиях выращивания. В течение

всего эксперимента общее содержание хлорофилла листьев овса (AtLeaf+) было на уровне 35...40 отн. ед. и не зависело от условий наполнения субстратов при выращивании.

Элементный состав грунтов и растений. Добавление коры сосны обыкновенной и шунгитовой крошки в концентрациях 10 г/кг в субстраты для выращивания овса посевного отразилось на элементном составе исходных грунтов. Так, при добавлении коры (УГ+К) отмечено увеличение содержания Mn, Zn и Mg в 1,5...2 раза; при добавлении шунгита (УГ+Ш) увеличилось содержание Fe в 8, Cu в 22, Zn в 14, Pb в 9, Ni в 11 раз, Mn — в 1,2 раза. При совместном использовании коры и шунгита (УГ+К+Ш) содержание Fe, Mg, Cu, Zn, Pb, Ni и Mn также многократно повысилось по сравнению с контрольным образцом (табл. 2).

Содержание Cu, Zn и Ni в исходных грунтах с шунгитом превышало ПДК для почв. Валовое содержание элементов [57]:

кларк элемента в земной коре, по А.В. Виноградову, мг/кг:

- Fe46 500
- Mg.....18 700
- Al.....80 500
- ПДК:
- S.....0,016 %
- Cu.....33 мг/кг
- Zn.....55 мг/кг
- Mn.....1500 мг/кг
- Pb.....65 мг/кг
- Ni.....20 мг/кг

После выращивания растений в течение 70 сут. содержание Fe, Mg, Cu, Zn в грунтах с корой (УГ+К) и шунгитом (УГ+Ш+К) значительно уменьшилось (см. табл. 2) вследствие поглощения металлов растениями овса посевного. Нами проанализировано накопление растениями овса пяти элементов металлов, имеющих наибольшее процентное содержание в шунгитовых породах, в частности Fe, Al, Mg, Cu и Zn (рис. 3, табл. 3).

Железо. Критический уровень содержания Fe в растениях более 300...600 мг/кг [24]. При добавлении шунгита (1772 мг/кг) оно увеличилось в 4 раза и при добавлении и коры и шунгита (1082 мг/кг) — в 2,5 раза до значений, превышающих нормальный уровень содержания Fe у растений. Основное количество Fe (85 %) накапливалось в корнях овса. При всех условиях выращивания КБП Fe был невысоким — 0,10...0,18. Добавление коры снижало поглощение Fe овсом: КБП всем растением снижался с 0,18 до 0,13.

Алюминий. Содержание Al у растений в ненарушенных условиях обитания существенно изменяется в пределах от 50 до 1000 мг/кг в надземных органах и до 2100 мг/кг — в корнях [25, 26].

Т а б л и ц а 2

Содержание элементов в различных типах грунтов (исходном и конечном) до и после эксперимента

Element content in different types of soil (initial and final) before and after the experiment

| Вариант грунта | Тип грунта | Содержание | | | | | | | | |
|----------------|------------|-------------|--------------|------------|------------|---------------|----------------|---------------|--------------|--------------|
| | | % | мг/кг | | | | | | | |
| | | | S | Fe | Mg | Al | Cu | Zn | Mn | Pb |
| 1) УГ | Исходный | – | 2780 ± 302 | 2300 ± 150 | – | 4,89 ± 1,02 | 10,71 ± 3,25 | 52,27 ± 2,56 | 2,41 ± 0,89 | 5,73 ± 1,78 |
| | Конечный | 0,19 ± 0,03 | 4530 ± 736 | 2197 ± 262 | 1023 ± 316 | 4,28 ± 0,38 | 4,21 ± 0,20 | – | – | – |
| 2) УГ+К | Исходный | – | 2735 ± 351 | 2852 ± 214 | – | 6,99 ± 0,89 | 14,59 ± 2,87 | 87,40 ± 7,52 | 2,26 ± 1,13 | 4,86 ± 0,85 |
| | Конечный | 0,12 ± 0,01 | 2081 ± 125 | 2675 ± 210 | 689 ± 35 | 2,09 ± 0,28 | 4,50 ± 0,39 | – | – | – |
| 3) УГ+Ш | Исходный | – | 24103 ± 3500 | 3141 ± 250 | – | 90,41 ± 7,89 | 151,74 ± 30,47 | 54,73 ± 10,25 | 20,51 ± 0,12 | 64,57 ± 6,89 |
| | Конечный | 0,30 ± 0,09 | 9615 ± 2988 | 2056 ± 221 | 870 ± 105 | 12,65 ± 5,19 | 14,05 ± 13,15 | – | – | – |
| 4) УГ+К+Ш | Исходный | – | 20392 ± 2210 | 3057 ± 310 | – | 79,36 ± 10,11 | 158,15 ± 12,87 | 66,88 ± 8,25 | 22,44 ± 4,98 | 63,48 ± 9,23 |
| | Конечный | 0,41 ± 0,12 | 8261 ± 1500 | 2680 ± 245 | 1212 ± 85 | 19,42 ± 1,97 | 36,66 ± 2,84 | – | – | – |

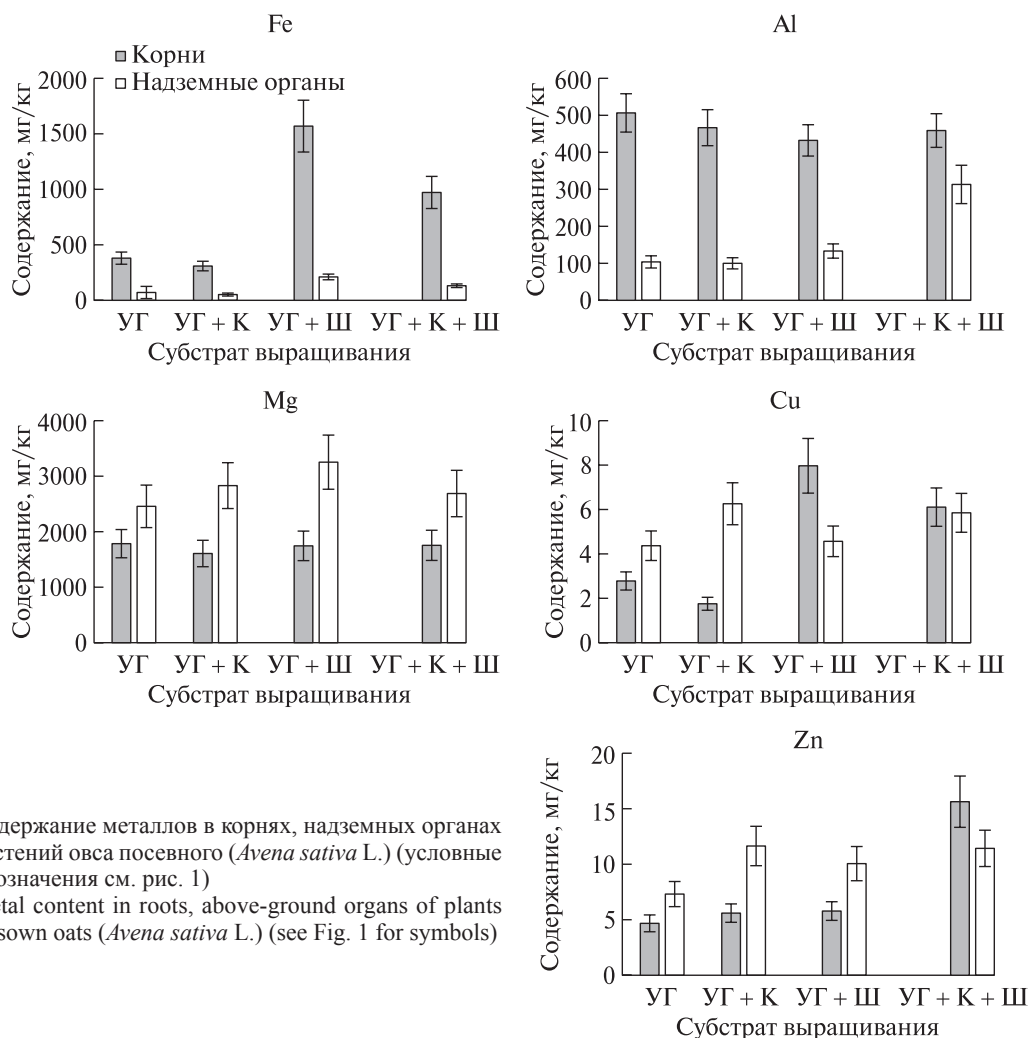


Рис. 3. Содержание металлов в корнях, надземных органах растений овса посевного (*Avena sativa* L.) (условные обозначения см. рис. 1)

Fig. 3. Metal content in roots, above-ground organs of plants of sown oats (*Avena sativa* L.) (see Fig. 1 for symbols)

Т а б л и ц а 3

Коэффициент биологического поглощения металлов (отн. ед.) корнями, надземными органами и всем растением овса посевного (*Avena sativa* L.)

Coefficient of biological absorption of metals (relative units) by roots, aboveground organs and the whole plant of sown oats (*Avena sativa* L.)

| Вариант грунта | Органы растений | Fe | Mg | Al | Cu | Zn |
|----------------|------------------|------|------|------|------|------|
| 1) УГ | Корни | 0,08 | 0,81 | 0,50 | 0,66 | 1,99 |
| | Надземные органы | 0,02 | 1,11 | 0,10 | 1,03 | 3,07 |
| | Все растение | 0,10 | 1,92 | 0,60 | 1,68 | 5,06 |
| 2) УГ+К | Корни | 0,15 | 0,60 | 0,68 | 0,87 | 2,21 |
| | Надземные органы | 0,02 | 1,06 | 0,15 | 3,00 | 4,56 |
| | Все растение | 0,17 | 1,66 | 0,82 | 3,87 | 6,77 |
| 3) УГ+Ш | Корни | 0,16 | 0,85 | 0,50 | 0,67 | 0,73 |
| | Надземные органы | 0,02 | 1,59 | 0,15 | 0,38 | 1,26 |
| | Все растение | 0,18 | 2,44 | 0,65 | 1,05 | 1,99 |
| 4) УГ+К+Ш | Корни | 0,32 | 0,65 | 0,30 | 0,32 | 0,75 |
| | Надземные органы | 0,30 | 1,01 | 0,26 | 0,30 | 0,55 |
| | Все растение | 0,62 | 1,66 | 0,56 | 0,62 | 1,29 |

Содержание Al у растений овса посевного было на уровне 500...600 мг/кг при выращивании в контрольном образце; с корой и с шунгитом — достоверно не отличалось. Основная доля Al (83 %) накапливалась в корнях растений. При совместном использовании коры и шунгита в субстратах (УГ+К+Ш) накопление Al в растениях значительно увеличилось и составило 781 мг/кг, за счет увеличения накопления металла в надземных органах. Для Al КБП составлял 0,56...0,82 всем растением и 0,30...0,68 его корнями. При этом добавление коры снижало поглощение Al корнями: КБП всем растением снижался с 0,65 до 0,56.

Магний. Mg, макроэлемент, количество которого у растений в норме может достигать до 14 000 мг/кг (листья амаранта *Amaranthus hypochondriacus* L.) [27]. Растения овса содержали в среднем 4300 мг/кг Mg в контрольном образце грунта и при добавлении коры (УГ+К) и шунгита (УГ+Ш). В условиях совместного использования коры и шунгита количество Mg в растениях было существенно выше — до 5008 мг/кг. При этом большая часть Mg (60 %) содержалась в надземных органах овса. Для Mg КБП всем растением составлял 1,66...2,44, в шунгитном субстрате был максимальным - 2,44.

Медь. Критический уровень содержания микроэлемента Cu у растений более 40 мг/кг [24]. При использовании шунгита (УГ+Ш) и совместно

коры и шунгита (УГ+К+Ш) в субстрате растения накапливали в 2 раза больше Cu (до 12 мг/кг) по сравнению с контрольным образцом. При этом в корнях значительно увеличилось содержание Cu — до 6...8 мг/кг. Значительно варьировал КБП Cu всем растением и был равен 0,62...3,87, максимальное значение зафиксировано при наличии коры в грунте. Однако при наличии шунгита в субстрате кора снижала поглощение Cu корнями овса, КБП всем растением снижался с 1,05 до 0,62.

Цинк. Критический уровень накопления микроэлемента Zn растениями более 100 мг/кг [24]. Во всех вариантах эксперимента содержание цинка в растениях овса посевного увеличивалось до 27...30 мг/кг при отдельном использовании и коры (УГ+К), и шунгита (УГ+Ш), и максимально при совместном использовании коры и шунгита (УГ+К+Ш) — до 48 мг/кг. В последнем случае увеличение накопления металла произошло за счет его накопления в корнях растений. В широком диапазоне изменялось значение КБП Zn всем растением — от 1,99 до 6,77. При наличии коры и шунгита КБП уменьшался по сравнению с контрольным образцом, и был минимальным (1,29) в варианте УГ+К+Ш

Содержание элементов неметаллов в растениях овса посевного после выращивания на грунтах с корой и шунгитом представлено на рис. 4. Можно отметить повышенное содержание S (43 %) в корнях в варианте УГ+К+Ш, K (7,63 %) и P (1,37 %) в надземных органах в варианте УГ+К и значительное увеличение S (до 0,41 %) в корнях, и особенно в надземных органах, при добавлении шунгита (УГ+Ш), коры и шунгита (УГ+К+Ш). Критический уровень содержания S у растений значительно изменяется, в зависимости от вида и фазы онтогенеза растения от 0,5 до 1,8 % [28]. В то же время при добавлении шунгита в грунт количество P достоверно снижалось до 0,7...0,8 % в надземных органах овса по сравнению с контрольным образцом.

Таким образом, при выращивании овса посевного кора и шунгит обогащали грунты металлами и S, которые накапливались в корнях и надземной массе растений. Содержание Zn, Cu и Mn было оптимальным, а содержание Fe, Al приближалось к критическим уровням у растений. Добавление коры в грунт повышало у растений количество дефицитных макроэлементов — P, K и элемента S, добавление шунгита увеличивало уровень S и снижало количество N и K в растениях.

Нами исследованы рост, развитие и содержание элементов в корнях и надземных органах растениями овса посевного (*Avena sativa* L.) при выращивании на субстратах с корой сосны обыкновенной и шунгитовой крошкой в длительном вегетационном эксперименте.

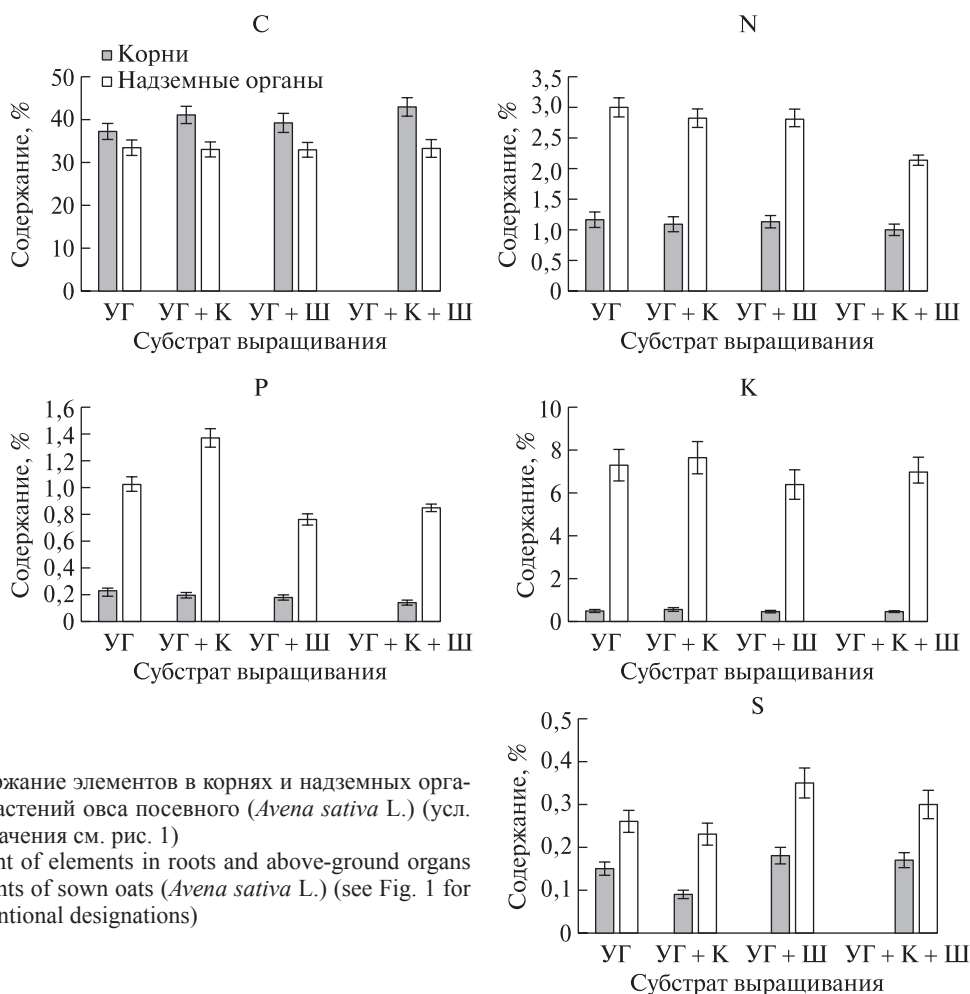


Рис. 4. Содержание элементов в корнях и надземных органах растений овса посевного (*Avena sativa* L.) (усл. обозначения см. рис. 1)

Fig. 4. Content of elements in roots and above-ground organs of plants of sown oats (*Avena sativa* L.) (see Fig. 1 for conventional designations)

Кора сосны обыкновенной богата макро- и микроэлементами: Са 83,7...89,9 %; К 4,2...5,0; Fe 3,0...6,2; Mg 2,0...2,8; Mn 1,0...2,4; Zn до 0,3; Си до 0,05 % [29]. За счет оптимального минерального состава и адсорбционных свойств клеточных стенок [30, 31] тканей кора древесных растений используется для создания компостов [32], субстратов для фиторемедиации загрязненных территорий [33], выращивания грибов [34] и растений [35].

Углеродсодержащие осадочные породы в Карелии впервые были описаны Н.Я. Озерецковским в XVIII в. как углистые сланцы. В XIX в., после выхода в свет работ А.А. Иностранцева, эти породы получили название «шунгиты», ставшее в наши дни довольно известным. А.А. Иностранцев описал четыре разновидности углеродсодержащих пород, одну из которых, обнаруженную им в районе д. Шуньга, предложил называть шунгитом. Позднее это название стали применять ко всем углеродсодержащим породам, обнаруженным в Карелии [11]. Считается, что шунгит является специфической формой углерода, представляющей собой некристаллический, неграфитируемый, фуллереноподобный углерод,

отличающийся от графитового на уровне надмолекулярной, атомной ионной структуры [36]. Элементный состав шунгитовых пород весьма разнообразен и зависит от месторождения [37]. Основу минерального вещества шунгитовых пород Зажогинского месторождения составляют мг/кг: Na (7038), Mg (6039), Al (37861), K (13628), Ca (4436), Ti (1412), Fe (40225), Cu (110), As (96), Ba (250), V (127), Mn (128), Zn (76), Zr (41), Pb(41), Cr (68), Se (17), Rb (30), Sr (37), Mo (12), Ce (10), Nd (9), Co(4), Ga (4), Br (2), Y (11), La (6), Sm (1), Gd (1), Dy (1), U (6), Th (4), Yb (0,8), Er (0,8) [8]. При добавлении коры и шунгита в концентрациях 10 г/кг в субстрат выращивания растений овса посевного, исходные грунты многократно обогатились всеми исследуемыми металлами (см. табл. 2). Можно отметить загрязнение (ПДК выше нормы) исходных грунтов Cu, Zn и Ni.

Растения овса посевного выращивались до фазы цветения, и анализ ростовой активности показал на начальных этапах онтогенеза растений стимулирующий эффект добавок из коры и шунгита во всех вариантах эксперимента. Особенно этот эффект проявился в первые дни выращивания овса. При этом шунгитовые добавки эффективнее

стимулировали рост растений. Можно предположить радиационное стимулирующее влияние на рост растений овса, так как шунгитовые породы характеризуются невысоким радиационным фоном. Далее, после 40 сут. выращивания (фаза кущения), рост растений замедлился и достоверно оставался повышенным в конце эксперимента только в варианте с корой и шунгитом УГ+К+Ш (см. рис. 1). Длина корней растений в конце эксперимента была достоверно повышенной на 20 % при выращивании на субстрате с добавлением коры (УГ+К).

Содержание общего хлорофилла достоверно не зависело от условия выращивания растений и было на уровне 35...40 отн. ед. В конце выращивания содержание фотосинтетических пигментов листа растений также не изменялось при внесении добавок из коры и шунгита и было типичным для овса посевного (см. рис. 1). Это свидетельствует об оптимальном функционировании фотосинтетического аппарата растений в течение всего цикла выращивания. Известно влияние шунгитовой крошки на физиологические процессы растений лука репчатого (*Allium cepa* L.). При концентрациях шунгита в почве 20 г/кг установлено снижение содержания пигментов и уменьшение величины потенциального квантового выхода фотохимической активности фотосистемы II при незначительном увеличении скорости фотосинтеза. Также показано увеличение у растений лука эффективности использования воды на фотосинтез (ЭИВ) при концентрации шунгита 10 г/кг почвы [15].

При выращивании овса на субстратах с корой и шунгитом практически во всех вариантах содержание элементов в растениях увеличивалось, по сравнению с контрольным образцом (см. рис. 3). При этом количество Zn, Cu и Mn было оптимальным, а содержание Fe и Al у растений приближалось к критическому уровню. Содержание Fe в растениях в варианте с корой и шунгитом (УГ+К+Ш) в конечных грунтах достоверно снизилось (на 40 %) относительно варианта только с шунгитом (УГ+Ш). Возможно, кора ограничивала поступление Fe в растения. Металлы Fe, Al преимущественно (83...85 %) депонировались в корнях овса посевного, Zn, Cu и Mg — в наземных органах растений.

Поглощение металлов характеризуется их коэффициентами поглощения. Если КБП больше 1, то он показывает во сколько раз уровень элемента больше в растении, чем в среде обитания, и наоборот, если КБП меньше 1, то содержание элемента в среде увеличено кратно коэффициенту, по сравнению с растением. То есть это динамический показатель, который может уменьшаться при увеличении абсолютного содержания

элемента в растении (например, при условии роста содержания элемента в грунте). Нашим исследованием установлено, что КБП Fe и Al был меньше 1, однако при этом наблюдался высокий уровень содержания металлов в растениях овса. Этот коэффициент зависит от природы поглощаемого элемента (плотности, молекулярной массы), активности и наличия переносчиков металла в клетке и в тканях (ризодермы, эндодермы, ксилемы корня) растения, концентрации элемента в среде обитания растений.

Так, Fe, *d*-металл, с высокой молекулярной массой, характеризуется высоким кларком в земной коре (4,65 % по А. В. Виноградову), в нормальных условиях КБП Fe обычно меньше 1, металл слабо транспортируется из корней в наземные органы растений [38]. Критические уровни содержания Fe у растений — более 300...600 мг/кг [24] и доходит до 3000 мг/кг у растений гипераккумуляторов этого металла [39]. Fe выполняет многочисленные функции: является кофактором аденозин-5'-фосфосульфатредуктазы в ассимиляции сульфатов [40], альтернативной оксидазы в дыхании [41], кофактором ферментов системы антиоксидантной защиты — каталазы [42], пероксидазы [43], супероксиддисмутазы [44], компонентом фотосистемы II (ферредоксин) [45] входит в состав цитохромов и железосодержащих белков ферритинов, выполняющих также антиоксидантную защиту клеток [46]. Содержание Fe на территории северо-западных регионов России повышено в наземных и водных экосистемах в связи с природными особенностями и ее антропогенным загрязнением [39], поэтому привносить дополнительно Fe с шунгитовыми субстратами в среду обитания растений несколько не оправдано.

Al, *p*-металл, обладающий амфотерными свойствами с определенной (как активатор сукцинатдегидрогеназы, пектинполигалактуроназы, как транспортирующий белки через ионные каналы, как создающий потенциал плазмалеммы), но малоизученной функцией у растений [47], также, как и Fe, широко распространен в земной коре (кларк 8,05 % по Виноградову А.В.). Фитотоксичность Al проявляется на кислых почвах, поскольку при pH менее 4,5 растворимость фосфатов Al резко возрастает [25, 48]. Растения значительно отличаются по уровню содержания Al в ненарушенных условиях — от 50 до 3000 мг/кг у растений гипераккумуляторов (чай *Camelia sinensis*, гортензия *Hydrangea* sp. и гречиха *Fagopyrum esculentum*), поэтому критический уровень содержания Al для растений достоверно не установлен. Хорошо известно, что токсичность металлов в растениях проявляется на клеточном, тканевом, организменном уровнях, являясь причиной различных нарушений физиологических процессов,

роста и развития растений [49]. Фитотоксическое действие Al^{3+} в присутствии Fe^{3+} уменьшается, поскольку Fe^{3+} , возможно, индуцируют синтез белков, подобных трансферрину и лактоферрину у животных; органических кислот и фитохелатинов, связывающих Al^{3+} , в клетках корня ячменя [50–52]. Присутствие Fe^{3+} снижает токсическое влияние Al^{3+} на уровне метаболических реакций. В формировании устойчивости растений к токсическому воздействию Al участвует ген толерантности *Alt*. Продуктом этого гена является белок — шаперон, который переносит органические кислоты в прикорневую зону, инактивируя Al^{3+} [53, 54].

Можно отметить повышенное содержание *S* (в 2 раза) — до 0,3...0,4 % в надземных органах овса посевного при выращивании на субстратах с добавлением шунгита (см. рис. 4). При этом в этих вариантах выращивания в грунтах содержание *S* также было высоким по сравнению с контрольным образцом. Среднее содержание *S* в надземной массе овса в ненарушенных условиях обитания обычно составляет 0,17...0,26 % [55]. В нашем эксперименте *S* содержалась в исходном универсальном грунте (сульфаты *Na* и *K*), в шунгитовой породе (см. табл. 1.), а также в коре древесных растений, особенно с нарушенных азротехногенным загрязнением территорий, так как *S* содержится в составе SO , SO_2 — газов в выбросах целлюлозно-бумажных комбинатов региона. После химических превращений в хвое сосны обыкновенной *S* в виде сульфитов и сульфатов включается в биохимические циклы в организме дерева и может выводиться из его обмена, депонируясь в коре [56].

Количество *N*, *K* и *C* значительно увеличивалось в растениях овса при выращивании растений на коровых субстратах. Это связано с оптимизацией минерального питания растений при обогащении универсального грунта корой.

Коэффициенты биологического поглощения биофильных элементов — *Mg*, *Cu* и *Zn* были в большинстве случаев больше единицы и имели максимальное значение при поглощении *Cu* (3,00...3,87), *Zn* (4,56...6,77) в условиях грунта и коры (УГ+К). Следует обратить внимание, что при совместном использовании коры и шунгита (УГ+К+Ш), КБП всех исследуемых металлов были ниже, чем в условиях только шунгитового субстрата (УГ+Ш). Так, КБП металлов всем растением снижались следующим образом: *Fe* 0,18 => 0,13, *Al* 0,65 => 0,56, *Mg* 2,44 => 1,66, *Cu* 1,05 => 0,62, *Zn* 1,99 => 1,29 (см. табл. 3). Можно сделать вывод, что при совместном использовании коры и шунгита в субстратах кора снижает поглощение металлов корнями растений овса из шунгитовой породы. Возможно, это свя-

зано с тем, что кора выступает ионообменником металлов, связывая их за счет химических функциональных групп вторичной клеточной стенки коры, в составе лигнина, фенолов, суберина, восков. Такой механизм депонирования металлов клеточной стенкой растительных тканей хорошо известен [30, 31]. Именно за счет этого корового влияния (ограничения поступления металлов в растения) ростовые показатели овса оставались повышенными в конце эксперимента в варианте с корой и шунгитом (УГ+К+Ш) (см. рис. 1).

Выводы

Установлено, что шунгитовые добавки на начальных этапах онтогенеза растений эффективнее стимулируют рост, чем коровые, а кора и шунгит в грунтах не влияют на фотосинтетическую функцию овса; грунты обогащались макро- и микроэлементами до оптимальных (*Fe*, *Mg*, *Mn*) и загрязняющих концентраций (*Cu*, *Zn*, *Ni*, *S*) при внесении шунгита отдельно и совместно с корой; кора снижает поглощение металлов корнями растений овса из шунгитовой породы при совместном использовании коры и шунгита в субстратах. При этом выявлено накопление растениями *Zn*, *Cu* и *Mn* до нормальных, а *Fe*, *Al* и *S* — до критических уровней содержания.

Результаты исследования свидетельствуют, что кору сосны обыкновенной можно безопасно и с положительным эффектом оптимизации минерального питания растений применять в агротехнологиях. Использование же шунгита для выращивания растений требует осторожного подхода, с учетом его концентрации, времени использования, фазы онтогенеза растений, с контролем содержания элементов в корнях и надземных органах.

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

Список литературы

- [1] ЛесПромИнформ. URL: <https://lesprominform.ru/news.html?id=20040> (дата обращения 09.03.2023).
- [2] Сеницын Н.Н., Телин Н.В., Грызлов В.С., Андреев А.С., Виноградова М.С., Гаркавченко Э.В., Гневашева В.П., Кузнецова В.П., Павлова А.И. Моделирование динамики выхода влаги и летучих веществ в процессе нагрева древесной биомассы (коры) // Вестник Череповецкого государственного университета, 2018. № 2 (83). С. 47–53.
- [3] Гришкова Л.Л. Использование древесной коры в качестве удобрений. М.: Изд-во ВНИПИЭИлеспром, 1982. № 10. С. 11–25.
- [4] Девятловская А.Н. Использование древесной коры в качестве тепличного грунта // Вестник КрасГАУ, 2010. № 2. С. 25–27.

- [5] Лоскутов С.Р., Семенович А.В., Анискина А.А. Продукты технического назначения из коры хвойных пород. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. 114 с.
- [6] Пастори З., Горбачева Г.А., Санаев В.Г., Мохачине И.Р., Борчок З. Состояние и перспективы использования древесной коры // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 5. С. 74–88. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-5-74-88
- [7] Робонен Е.В., Зайцева М.И., Чернобровкина Н.П., Чернышенко О.В., Васильев С.Б. Опыт разработки и использования контейнерных субстратов для лесных питомников. Альтернативы торфу // Resources and Technology, 2015. Т. 12. № 1. С. 11–18.
- [8] Платонов В.В., Прокопченков Д.В., Проскуряков В.А., Сычев А.И., Честнова Т.В., Швыкин А.Ю. Химический состав минерального вещества шунгитовой породы Зажогинского месторождения Карельского Заонежья // Вестник новых медицинских технологий, 2006. Т. XIII. № 4. С. 132–135.
- [9] Дубровина И.А. Изменение содержания общего углерода, азота и фосфора в почвах таежной зоны Республики Карелия при сельскохозяйственном использовании // Вестник Томского государственного университета. Биология, 2018. № 41. С. 27–41.
- [10] Панасюгин А.С., Цыганов А.Р., Григорьев С.В., Чипурко З.Н., Гузова Л.М. Оценка возможности использования шунгита Зажогинского месторождения в металлургии // Литье и металлургия, 2013. № 3. С. 33–35.
- [11] Кондрашова Н.И., Медведев П.В. Влияние микроэлементного состава углеродсодержащих пород на возможность их использования в водоочистке (на примере шунгитов из Онежской палеопротерозойской структуры Карелии) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2021. Т. 332. № 9. С. 43–53.
- [12] Мизин В.Г., Страхов В.М. Промышленный опыт использования шунгитовых пород в производстве ферросплавов // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации, 2009. № 10 (1318). С. 78–84.
- [13] Ковалевский В.В. Шунгитовый углерод — структурные особенности и приложение к технологическим процессам // Шунгитовые породы Карелии: геология, строение, инновационные материалы и технологии «Шунгит — 2020 — 2021»: материалы конференции с международным участием. Петрозаводск, 29 июня — 1 июля 2021 г. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2021. С. 29–33.
- [14] Тойкка М.А., Кекконен А.П. Шунгит как удобрение // Ученые записки Карело-Финского государственного университета, 1946. Т. 1. С. 214–268.
- [15] Ikkonen E., Chazhengina S., Butilkina M., Sidorova V. Physiological response of onion (*Allium cepa* L.) seedlings to shungite application under two soil water regimes // Acta Physiologiae Plantarum, 2021, pp. 43–76. DOI: 10.1007/s11738-021-03239-9
- [16] Тимейко Л.В., Кузнецова Л.А., Голубева О.А. К вопросу использования шунгитов в сельскохозяйственном производстве // Черноземы Центральной России: генезис, эволюция и проблемы рационального использования: Сб. материалов науч. конф., посвященной 80-летию кафедры почвоведения и управления земельными ресурсами в 100-летней истории Воронежского государственного университета, Воронеж, 15–19 мая 2017 года. Воронеж: Изд-во Воронежского государственного университета, 2017. С. 233–237.
- [17] Теребова Е.Н. Азотные и фосфорные соединения хвойных растений при аэротехногенном загрязнении в условиях Северо-Запада России: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 2002. 26 с.
- [18] Щербенко Т.А., Копчик Г.Н., Гроненберг Б.-Я., Лукина Н.В., Ливанцова С.Ю. Поглощение элементов питания и тяжелых металлов сосной в условиях атмосферного загрязнения // Вестник Московского университета. Сер. 17. Почвоведение, 2008. № 2. С. 9–16.
- [19] Дейнес Ю.Е., Ковалевский В.В., Первунина А.В., Ромашкин А.Е., Рычанчик Д.В., Иешко Е.П. Шунгитовые породы Карелии: от геологических исследований к перспективам использования в инновационных технологиях // Труды КарНЦ РАН. Комплексные научные исследования КарНЦ РАН, 2021. № 7. С. 72–88.
- [20] Чаженгина С.Ю., Рожкова В.С., Кочнева И.В. Моделирование процессов абиогенного выветривания углеродистого вещества палеопротерозойских шунгитовых пород Онежской структуры (Карелия) // Труды Карельского научного центра РАН, 2019. № 2. С. 67–79.
- [21] Пономарев А.П., Подолец А.А., Макина О.А. Использование водного экстракта минерала шунгита для удаления из воды бактериальной микрофлоры // Водоснабжение и санитарная техника, 2017. № 9. С. 17–24.
- [22] Марковская Е.Ф., Теребова Е.Н., Андросова В.И., Галибина Н.А., Никерова К.М., Морозова К.В., Гуляева Е.Н., Шибаева Т.Г., Новичонок Е.В. Физиолого-биохимические методы исследования растений и лишайников // Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2018. URL: <https://elibrary.petsu.ru/book.shtml?id=29557> (дата обращения 08.03.2023).
- [23] Воробьева Л.А., Лопухина О.В., Салпагарова И.А. Теория и практика химического анализа почв. М.: Геос, 2006. 400 с.
- [24] Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. Boca Raton, FL, USA: CRC Press/Taylor & Francis Group, 548 p. DOI:10.1016/j.sajb.2012.03.008
- [25] Широких И.Г., Ашихмина Т.Я. Повышение толерантности растений к алюминию на кислых почвах методами биотехнологии (обзор) // Теоретическая и прикладная экология, 2016. № 2. С. 12–19.
- [26] Шукин В.М., Северинова Е.Ю., Кузьмина Н.Е., Яшкир В.А. Определение содержания алюминия в цветках ромашки аптечной методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой // Ведомости Научного центра экспертизы средств медицинского применения, 2016. № 3. С. 49–52.
- [27] Коренская И.М., Беляева А.А., Колосова О.А., Трофимова Т.Г., Измалкова И.Е., Сливкин А.И. Изучение анатомо-диагностических признаков и элементного состава листьев амаранта печального, культивируемого в Воронежской области // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация, 2020. Т. 3. С. 37–44.
- [28] Жуйков Д.В. Сера и микроэлементы в агроценозах (обзор) // Достижения науки и техники АПК, 2020. Т. 34. № 11. С. 32–42.
- [29] Храменкова О.М., Новиков Р.И. Минеральный состав коры сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) различных типов леса // Бюллетень науки и практики, 2016. № 9. С. 31–35.
- [30] Terebova E.N., Markovskaya E.F., Shmakova N.Yu. Ion-exchange properties and swelling capacity of leaf cell wall of Arctic plants // Czech Polar Reports, Brno, 2018, v. 8, no. 1, pp. 132–142. DOI: 10.5817/CPR2018-1-10
- [31] Terebova E.N., Markovskaya E.F., Androsova V.I., Pavlova M.A., Oreshnikova N.V. Cell wall functional activity and metal accumulation of halophytic plant species *Plantago maritima* and *Triglochin maritima* on the White Sea littoral zone (NW Russia) // Czech Polar Reports, 2020, v. 10(2), pp. 169–188.

- [32] Климова Е.В. Использование древесной коры и цеолитов при выращивании декоративных культур (выращивание на искусственных почвогрунтах в защищенном грунте) // Экологическая безопасность в АПК. Реферативный журнал, 2003. № 3. С. 606.
- [33] Борматенков А.М., Графова Е.О., Зайцева М.И., Стюнев В.С. Использование смеси осадков сточных вод и отходов лесоперерабатывающего производства как почвенной субстрата для рекультивации нарушенных земель // Resources and Technology, 2020. Т. 17. № 2. С. 97–113.
- [34] Бондарь П.Н. Использование отходов деревообрабатывающей промышленности для создания биопрепаратов на основе грибов рода *Trichoderma* // Хвойные бореальной зоны, 2015. Т. 33, № 5–6. С. 286–290.
- [35] Ульянова О.А. Использование древесной коры и цеолитов при выращивании декоративных культур // Агрохимия, 2002. № 7. С. 47–55.
- [36] Ковалевский В.В. Шунгит или высший антраксолит? // Записки Российской минералогического общества, 2009. Т. 138. № 5. С. 97.
- [37] Прокопченко Д.В., Платонов В.В., Проскуряков В.А., Сычев А.И., Честнова Т.В., Швыкин А.Ю. Химический состав минерального вещества шунгитовой породы Зажогинского месторождения Карельского Заонежья // Вестник новых медицинских технологий, 2006. Т. XIII. № 4. С. 132–133.
- [38] Terebova E. N., Markovskaya E. F., Androsova V. I., Galibina N. A., Kaipainen E. Potential for *Salix schwerinii* E. Wolf to uptake heavy metals in the contaminated territories of mining industry in the north-west Russia // Siberian Journal of Forest Science, 2017, v. 1, pp. 74–86. DOI: 10.15372/SJFS20170108
- [39] Теребова Е.Н., Павлова М.А., Орешникова Н.В. Аккумуляция железа растениями галофитами на литорали Белого моря // Известия РАН. Серия Биологическая, 2023. № 3. С. 413–425.
- [40] Kopriva S., Mugford S.G., Matthewman C., Koprivova A. Plant sulfate assimilation genes: redundancy versus specialization // Plant Cell Rep., 2009, v. 28(12), pp. 1769–1780. DOI: 10.1007/s00299-009-0793-0
- [41] Albury M.S., Affourtit C., Crichton P.G, Moore A.L. Structure of the plant alternative oxidase: Site-Directed mutagenesis provides new information on the active site and membrane topology // J. of Biological Chemistry, 2002, v. 277(2), pp. 1190–1194. DOI: 10.1074/jbc.M109853200
- [42] Grigoras A.G. Catalase immobilization – A review // Biochemical Engineering Journal, 2017, v. 117 (B), pp. 1–20. DOI: 10.1016/j.bej.2016.10.021
- [43] Rizhsky L., Liang. H., Mittler R. The Water–Water Cycle Is Essential for Chloroplast Protection in the Absence of Stress // The J. of Biological Chemistry, 2003, v. 278, no. 40, pp. 38921–38926. DOI: 10.1074/jbc.M304987200
- [44] McKersie B.D., Murnaghan J., Jones K.S., Bowley S.R. Iron-superoxide dismutase expression in transgenic alfalfa increases winter survival without a detectable increase in photosynthetic oxidative stress tolerance // Plant Physiol., 2000, v. 122(4), pp. 1427–1437. DOI: 10.1104/pp.122.4.1427
- [45] Hell R., Stephan U.W. Iron uptake, trafficking and homeostasis in plants // Planta, 2003, v. 216(4), pp. 541–551. DOI: 10.1007/s00425-002-0920-4
- [46] Briat J.F., Duc C., Ravet K., Gaymard F. Ferritins and iron storage in plants // Biochim Biophys Acta, 2010, v. 1800(8), pp. 806–814. DOI: 10.1016/j.bbagen.2009.12.003
- [47] Яковлева О.В. Фитотоксичность ионов алюминия // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции, 2018. № 179 (3). С. 315–331.
- [48] Bose J., Babourina O., Shabala S., Rengel Z. Low-pH and aluminium resistance in *Arabidopsis* correlates with high cytosolic magnesium content and increased magnesium uptake by plant roots // Plant Cell Physiol, 2013, v. 54, pp. 1093–1104. DOI: 10.1093/pcp/pct064
- [49] Markovskaya E.F., Terebova E.N., Androsova V.I., Pavlova M.A. Ecological and physiological features of metal accumulation of halophytic plants on the White Sea coast. Handbook of bioremediation: Physiological, Molecular and Biotechnological Interventions / Eds. M. Hasanuzzaman, M. Narasimha V. Prasad. Academic Press, 2020, pp. 295–327. DOI:10.1016/b978-0-12-819382-2.00019-3
- [50] Амосова Н.В., Сынзыныс Б.И. О комбинированном действии алюминия и железа на проростки ячменя и пшеницы // Сельскохозяйственная биология, 2005. № 1. С. 46–49.
- [51] Амосова Н.В., Сынзыныс Б.И., Ульяненко Л.Н. Чувствительность различных сортов ячменя к действию алюминия и железа // Наука сельскохозяйственного производства и образования, 2004. С. 6–8.
- [52] Bose J., Babourina O., Rengel Z. Role of magnesium in alleviation of aluminium toxicity in plants // J. Exp. Bot., 2011, v. 62, pp. 2251–2264. DOI: 10.1093/jxb/erq456
- [53] Moshtaghie A.A., Skillen A.W. Binding of aluminum to transferrin and lactoferrin // Biochem Soc. Trans., 1986, no. 14, pp. 916–917.
- [54] Verkieij J.A.C., Schat H. Mechanisms of metal tolerance in higher plants // Heavy metal tolerance in plants: evolutionary aspects / Ed. A.J. Shaw. N.Y., 1990, pp. 179–193.
- [55] Аристархов А.Н. Сера в агроэкосистемах России: мониторинг содержания в почвах и эффективность ее применения // Международный сельскохозяйственный журнал, 2016. № 5. С. 39–47.
- [56] Лукина Н.В., Никонов В.В. Биогеохимические циклы в лесах Севера в условиях аэротехногенного загрязнения. В 2-х ч. Ч.1. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра, 1996. 213 с.
- [57] СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». Официальный интернет-портал правовой информации. 2021. 998 с.

Сведения об авторах

Теребова Елена Николаевна — канд. биол. наук, доцент кафедры ботаники и физиологии растений, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», eterebova@gmail.com

Орешникова Наталия Владимировна — канд. биол. наук, доцент факультета почвоведения, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», ogreshinka@list.ru

Павлова Мария Андреевна — аспирант кафедры ботаники и физиологии растений, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», maria-leta@yandex.ru

Стародубцева Анастасия Андреевна — канд. биол. наук, доцент кафедры ботаники и физиологии растений, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», korzunina84@mail.ru

Поступила в редакцию 28.03.2023.

Одобрено после рецензирования 21.06.2023.

Принята к публикации 01.12.2023.

APPLICATION OF SCOTS PINE BARK AND SHUNGITE CHIPS FOR GROWING OATS (*AVENA SATIVA* L.) IN PROTECTED GROUND

E.N. Terebova^{1✉}, N.V. Oreshnikova², M.A. Pavlova¹, A.A. Starodubtseva¹

¹Petrozavodsk State University, 33, Lenina st., 185910, Petrozavodsk, Russia

²Lomonosov Moscow State University, named after M.V. Lomonosov, 1, Leninskiye Gory st., 119991, Moscow, Russia

eterebova@gmail.com

The study results on the possible application of Scots pine bark (*Pinus sylvestris* L.) and shungite chips for growing oats (*Avena sativa* L.) in a laboratory experiment for 70 days are presented. Growth parameters, the content of photosynthetic leaf pigments (chlorophylls A, B, carotenoids), the content of macroelements (C, N, P, K, S, Fe, Mg) and microelements (Al, Zn, Cu) were analyzed, and the coefficients of biological absorption of metals by roots, aboveground organs and the entire oat plant were calculated. The experiments were carried out to enrich soils with macro- and microelements to optimal (Fe, Mg, Mn) and contaminant levels (Cu, Zn, Ni, S), by adding shungite to universal soil (control sample) in concentrations of 10 g/kg separately and together with pine bark. Stimulation of growth processes in oat plants with their subsequent slowdown at the end of the experiment is shown when using both bark and shungite in substrates. It was found that shungite additives at the initial stages of plant ontogenesis stimulated growth more effectively than bark additives, and bark and shungite in soils did not affect the photosynthetic function of oats. It was revealed that plants, growing on substrates with bark and shungite, accumulated Zn, Cu and Mn to normal levels, while Fe, Al and S to critical levels. It was concluded that Scots pine bark can be safely used in agricultural technologies with a positive effect of optimizing the mineral nutrition of plants.

Keywords: bark, Scots pine, shungite, oats, macro- and microelements, biological absorption coefficients

Suggested citation: Terebova E.N., Oreshnikova N.V., Pavlova M.A., Starodubtseva A.A. *Ispol'zovanie kory sosny obyknovnoy i shungitovoy kroshki dlya vyrashchivaniya ovsa posevnogo (Avena sativa L.) v zakrytom grunte* [Application of Scots pine bark and shungite chips for growing oats (*Avena sativa* L.) in protected ground]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 2, pp. 55–69. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-55-69

References

- [1] LesPromInform [LesPromInform]. Available at: <https://lesprominform.ru/news.html?id=20040> (accessed 03.09.2023).
- [2] Sinitsyn N.N., Telin N.V., Gryzlov V.S., Andreev A.S., Vinogradova M.S., Garkavchenko E.V., Gnevasheva V.P., Kuznetsova V.P., Pavlova A.I. *Modelirovanie dinamiki vykhoda vlagi i letuchikh veshchestv v protsesse nagreva drevesnoy biomassy (kory)* [Modeling the dynamics of the release of moisture and volatile substances during the heating of woody biomass (bark)]. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Cherepovets State University], 2018, no. 2 (83), pp. 47–53.
- [3] Grishkova L.L. *Ispol'zovanie drevesnoy kory v kachestve udobreniy* [Use of tree bark as fertilizer]. Moscow: VNIPIEIllesprom, 1982, no. 10, pp. 11–25.
- [4] Devyatlovskaya A.N. *Ispol'zovanie drevesnoy kory v kachestve teplichnogo grunta* [The use of tree bark as a greenhouse soil]. *Vestnik KrasGAU* [KrasSAU Bulletin], 2010, no. 2, pp. 25–27.
- [5] Loskutov S.R., Semenovich A.V., Aniskina A.A. *Produkty tekhnicheskogo naznacheniya iz kory khvoynykh porod* [Technical products from the bark of coniferous species]. Novosibirsk: Publishing house of SO RAS, 2010, 114 p.
- [6] Pásztor Z., Gorbacheva G.A., Sanaev V.G., Mohácsiné I.R., Börsök Z. *Sostoyanie i perspektivy ispol'zovaniya drevesnoy kory* [State and prospects of tree bark use]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 5, pp. 74–88. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-5-74-88

- [7] Robonen E.V., Zaytseva M.I., Chernobrovkina N.P., Chernyshenko O.V., Vasil'ev S.B. *Opyt razrabotki i ispol'zovaniya konteynernykh substratov dlya lesnykh pitomnikov. Alternatives to peat*. Resources and Technology, 2015, v. 12, no. 1, pp. 11–18. DOI: 10.15393/j2.art.2015.3081
- [8] Platonov V.V., Prokopchenkov D.V., Proskuryakov V.A., Sychev A.I., Chestnova T.V., Shvykin A.Yu. *Khimicheskiy sostav mineral'nogo veshchestva shungitovoy porody Zazhoginskogo mestorozhdeniya Karel'skogo Zaonezh'ya* [The chemical composition of the mineral substance of the shungite rock of the Zazhoginsky deposit of the Karelian Zaonezhye]. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy [Bulletin of New Medical Technologies], 2006, v. XIII, no. 4, pp. 132–135.
- [9] Dubrovina I.A. *Izmenenie soderzhaniya obshchego ugleroda, azota i fosfora v pochvakh taezhnoy zony Respubliki Kareliya pri sel'skokhozyaystvennom ispol'zovanii* [Changes in the content of total carbon, nitrogen and phosphorus in soils of the taiga zone of the Republic of Karelia during agricultural use]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biology [Bulletin of the Tomsk State University. Biology], 2018, no. 41, pp. 27–41. DOI: 10.17223/19988591/41/2
- [10] Panasyugin A.S., Tsyganov A.R., Grigor'ev S.V., Chipurko Z.N., Guzova L.M. *Otsenka vozmozhnosti ispol'zovaniya shungita Zazhoginskogo mestorozhdeniya v metallurgii* [Evaluation of the possibility of using shungite from the Zazhoginsky deposit in metallurgy]. Lit'e i metallurgiya [Casting and metallurgy], 2013, no. 3, pp. 33–35.
- [11] Kondrashova N.I., Medvedev P.V. *Vliyanie mikroelementnogo sostava uglirodosoderzhashchikh porod na vozmozhnost' ikh ispol'zovaniya v vodoочистке (na primere shungitov iz Onezhskoy paleoproterozoyskoy struktury Karelii)* [Influence of microelement composition of carbonaceous rocks on the possibility of their use in water purification (on the example of shungites from the Onega Paleoproterozoic structure of Karelia)]. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources], 2021, v. 332, no. 9, pp. 43–53. DOI: 10.18799/24131830/2021/9/3352
- [12] Mizin V.G., Strakhov V.M. *Promyshlennyy opyt ispol'zovaniya shungitovykh porod v proizvodstve ferrosplavov* [Industrial experience of using shungite rocks in the production of ferroalloys]. Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii [Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information], 2009, no. 10(1318), pp. 78–84.
- [13] Kovalevskiy V.V. *Shungitovyy uglerod — strukturnye osobennosti i prilozhenie k tekhnologicheskim protsessam* [Shungite carbon — structural features and application to technological processes]. Shungitovye porody Karelii: geologiya, stroenie, innovatsionnye materialy i tekhnologii «Shungit – 2020 – 2021: materialy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem [Shungite rocks of Karelia: geology, structure, innovative materials and technologies «Shungite – 2020 – 2021»: materials of the conference with international participation]. Petrozavodsk, June 29 — July 1, 2021. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2021, pp. 29–33.
- [14] Toikka M.A., Kekkonen A.P. *Shungit kak udobrenie* [Shungite as a fertilizer]. Uchenye zapiski Karelo-finskogo gosudarstvennogo universiteta [Scientific notes of the Karelian-Finnish State University], 1946, v. 1, pp. 214–268.
- [15] Ikkonen E., Chazhengina S., Butilkina M., Sidorova V. *Physiological response of onion (*Allium cepa* L.) seedlings to shungite application under two soil water regimes*. Acta Physiologiae Plantarum, 2021, pp. 43–76. DOI: 10.1007/s11738-021-03239-9
- [16] Timeyko L.V., Kuznetsova L.A., Golubeva O.A. *K voprosu ispol'zovaniya shungitov v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve* [On the issue of using shungites in agricultural production]. Chernozemy Tsentral'noy Rossii: genesis, evolyutsiya i problemy ratsional'nogo ispol'zovaniya: sbornik materialov nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy 80-letiyu kafedry pochvovedeniya i upravleniya zemel'nymi resursami v 100-letney istorii Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta [Chernozems of Central Russia: genesis, evolution and problems of rational use: collection of materials of a scientific conference dedicated to the 80th anniversary of the Department of Soil Science and Land Management in the 100-year history of Voronezh State University], Voronezh, 15–19 May 2017. Voronezh: Voronezh State University, 2017, pp. 233–237.
- [17] Terebova E.N. *Azotnye i fosfornye soedineniya khvoynykh rasteniy pri aerotekhnogennom zagryaznenii v usloviyakh Severo-Zapada Rossii* [Nitrogen and phosphorus compounds of coniferous plants under aerotechnogenic pollution in the conditions of the North-West of Russia]. Abs. Diss. Cand. Sci. (Biol.). Petrozavodsk, 2002, 26 p.
- [18] Shcherbenko T.A., Koptsik G.N., Gronenberg B.-Ya., Lukina N.V., Livantsova S.Yu. *Pogloshchenie elementov pitaniya i tyazhelykh metallov sosnoy v usloviyakh atmosfernogo zagryazneniya* [Absorption of batteries and heavy metals by pine under conditions of atmospheric pollution]. Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 17. Pochvovedenie [Bulletin of Moscow University. Ser. 17. Soil science], 2008, no. 2, pp. 9–16.
- [19] Deynes Yu.E., Kovalevskiy V.V., Pervunina A.V., Romashkin A.E., Rychanchik D.V., Ieshko E.P. *Shungitovye porody Karelii: ot geologicheskikh issledovaniy k perspektivam ispol'zovaniya v innovatsionnykh tekhnologiyakh* [Shungite rocks of Karelia: from geological research to prospects for use in innovative technologies]. Trudy KarNC RAN. № 7. Kompleksnye nauchnye issledovaniya KarNC RAN [Transactions of Karelian Research Center of Russian Academy of Sciences]. Complex scientific researches of KarRC RAS, 2021, no. 7, pp. 72–88. DOI: 10.17076/them1426
- [20] Chazhengina S.Yu., Rozhkova V.S., Kochneva I.V. *Modelirovanie protsessov abiogennoy vyvetrivaniya uglirodistogo veshchestva paleoproterozoyskikh shungitovykh porod Onezhskoy struktury (Kareliya)* [Modeling of processes of abiogenic weathering of carbonaceous matter of Paleoproterozoic shungite rocks of the Onega structure (Karelia)]. Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN [Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2019, no. 2, pp. 67–79. DOI: 10.17076/geo827
- [21] Ponomarev A.P., Podolets A.A., Makina O.A. *Ispol'zovanie vodnogo ekstrakta minerala shungita dlya udaleniya iz vody bakterial'noy mikroflory* [The use of an aqueous extract of the mineral shungite to remove bacterial microflora from water]. Vodopostavka i sanitarnaya tekhnika [Water Supply and Sanitary Engineering], 2017, no. 9, pp. 17–24.
- [22] Markovskaya E.F., Terebova E.N., Androsova V.I., Galibina N.A., Nikerova K.M., Morozova K.V., Gulyaeva E.N., Shibaeva T.G., Novichonok E.V. *Fiziologo-biokhimicheskie metody issledovaniya rasteniy i lishaynikov* [Physiological and biochemical methods for the study of plants and lichens]. Petrozavodsk: PetrSU Publishing House. 2018. Available at: <https://elibrary.petrSU.ru/book.shtml?id=29557> (accessed 08.03.2023).
- [23] Vorob'eva L.A., Lopukhina O. V., Salpagarova I. A. *Teoriya i praktika khimicheskogo analiza pochv* [Theory and practice of soil chemical analysis]. Moscow: Geos, 2006, 400 p.

- [24] Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. Boca Raton, FL, USA: CRC Press/Taylor & Francis Group, 548 p. DOI: 10.1016/j.sajb.2012.03.008
- [25] Shirokikh I.G., Ashikhmina T.Ya. *Povyshenie tolerantnosti rasteniy k alyuminiyu na kislykh pochvakh metodami biotekhnologii (obzor)* [Increasing plant tolerance to aluminum on acidic soils using biotechnology methods (review)]. Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya [Theoretical and applied ecology], 2016, no. 2, pp. 12–19.
- [26] Shchukin V.M., Severinova E.Yu., Kuz'mina N.E., Yashkir V.A. *Opreделение soderzhaniya alyuminiya v tsvetkakh romashki aptechnoy metodom atomno-emissionnoy spektrometrii s induktivno svyazannoy plazmoy* [Determination of aluminum content in chamomile flowers by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry]. Vedomosti Nauchnogo centra ekspertizy sredstv medicinskogo primeneniya [Bulletin of the Scientific Center for Expertise of Medical Applications], 2016, no. 3, pp. 49–52.
- [27] Korenskaya I.M., Belyaeva A.A., Kolosova O.A., Trofimova T.G., Izmalkova I.E., Slivkin A.I. *Izuchenie anatomo-diagnosticheskikh priznakov i elementnogo sostava list'ev amaranta pechal'nogo, kul'tiviruemogo v Voronezhskoy oblasti* [Study of anatomical and diagnostic features and elemental composition of sad amaranth leaves cultivated in the Voronezh region]. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Himiya. Biologiya. Farmaciya [Bulletin of the Voronezh State University]. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy, 2020, v. 3, pp. 37–44.
- [28] Zhuykov D.V. *Sera i mikroelementy v agrotsenozakh (obzor)* [Sulfur and microelements in agrocenoses (review)]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK [Achievements of Science and Technology of Agro-Industrial Complex], 2020, v. 34, no. 11, pp. 32–42. DOI: 10.24411/0235-2451-2020-11105
- [29] Khrumchenkova O.M., Novikov R.I. *Mineral'nyy sostav kory sosny obyknovennoy (Pinus sylvestris L.) razlichnykh tipov lesa* [Mineral composition of the bark of Scotch pine (*Pinus sylvestris* L.) of different forest types]. Byulleten' nauki i praktiki [Bulletin of Science and Practice], 2016, no. 9, pp. 31–35. DOI: 10.5281/zenodo.154207
- [30] Terebova E.N., Markovskaya E.F., Shmakova N.Yu. Ion-exchange properties and swelling capacity of leaf cell wall of Arctic plants. Czech Polar Reports, Brno, 2018, v. 8, no. 1, pp. 132–142. DOI: 10.5817/CPR2018-1-10
- [31] Terebova E.N., Markovskaya E.F., Androsova V.I., Pavlova M.A., Oreshnikova N.V. Cell wall functional activity and metal accumulation of halophytic plant species *Plantago maritima* and *Triglochin maritima* on the White Sea littoral zone (NW Russia). Czech Polar Reports, 2020, v. 10(2), pp. 169–188.
- [32] Klimova E.V. *Ispol'zovanie drevesnoy kory i tseolitov pri vyrashchivanii dekorativnykh kul'tur (vyrashchivanie na iskusstvennykh pochvogruntakh v zashchishchennom grunte)*. [The use of tree bark and zeolites in the cultivation of ornamental crops (cultivation on artificial soils in protected ground)]. Ekologicheskaya bezopasnost' v APK. Referativnyy zhurnal [Ecological safety in the agro-industrial complex. Abstract journal], no. 3, 2003, p. 606.
- [33] Bormatenkov A.M., Grafova E.O., Zaytseva M.I., Syuney V.S. *Ispol'zovanie smesi osadkov stochnykh vod i otkhodov lesopererabatyvayushchego proizvodstva kak pochvennogo substrata dlya rekul'tivatsii narushennykh zemel'* [The use of a mixture of sewage sludge and timber processing waste as a soil substrate for the reclamation of disturbed lands]. Resources and Technology, 2020, v. 17, no. 2, pp. 97–113.
- [34] Bondar' P.N. *Ispol'zovanie otkhodov derevoobratyvyushchey promyshlennosti dlya sozdaniya biopreparatov na osnove gribov roda Trichoderma* [Use of woodworking industry waste to create biopreparations based on fungi of the genus *Trichoderma*]. Khvoynye boreal'noy zony [Conifers of the boreal zone], 2015, v. 33, no. 5–6, pp. 286–290.
- [35] Ul'yanova O.A. *Ispol'zovanie drevesnoy kory i tseolitov pri vyrashchivanii dekorativnykh kul'tur* [The use of wood bark and zeolites in the cultivation of ornamental crops]. Agrohimiya [Agrochemistry], 2002, no. 7, pp. 47–55.
- [36] Kovalevskiy V.V. *Shungit ili vysshiy antraksolit?* [Shungite or higher anthraxolite?]. Zapiski Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva [Notes of the Russian Mineralogical Society], 2009, v. 138, no. 5, p. 97.
- [37] Prokopchenkov D.V., Platonov V.V., Proskuryakov V.A., Sychev A.I., Chestnova T.V., Shvykin A.Yu. *Khimicheskyy sostav mineral'nogo veshchestva shungitovoy porody Zazhoginskogo mestorozhdeniya Karel'skogo Zaonezh'ya* [The chemical composition of the mineral substance of the shungite rock of the Zazhoginsky deposit of the Karelian Zaonezh'ye]. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy [Bulletin of new medical technologies], 2006, v. XIII, no. 4, pp. 132–133.
- [38] Terebova E. N., Markovskaya E. F., Androsova V. I., Galibina N. A., Kaipainen E. Potential for *Salix schwerinii* E. Wolf to uptake heavy metals in the contaminated territories of mining industry in the north-west Russia. Siberian Journal of Forest Science, 2017, v. 1, pp. 74–86. DOI: 10.15372/SJFS20170108
- [39] Terebova E.N., Pavlova M.A., Oreshnikova N.V. *Akkumulatsiya zheleza rasteniyami galofitami na litorali Belogo morya* [Accumulation of iron by halophyte plants in the littoral of the White Sea]. Izvestiya RAN. Seriya Biologicheskaya [Biology Bulletin], 2023, no. 3, pp. 10–18.
- [40] Kopriva S., Mugford S.G., Matthewman C., Koprivova A. Plant sulfate assimilation genes: redundancy versus specialization. Plant Cell Rep., 2009, v. 28(12), pp. 1769–1780. DOI: 10.1007/s00299-009-0793-0
- [41] Albury M.S., Affourtit C., Crichton P.G, Moore A.L. Structure of the plant alternative oxidase: Site-Directed mutagenesis provides new information on the active site and membrane topology. J. of Biological Chemistry, 2002, v. 277(2), pp. 1190–1194. DOI: 10.1074/jbc.M109853200
- [42] Grigoros A.G. Catalase immobilization – A review. Biochemical Engineering Journal, 2017, v. 117 (B), pp. 1–20. DOI: 10.1016/j.bej.2016.10.021
- [43] Rizhsky L., Liang, H., Mittler R. The Water–Water Cycle Is Essential for Chloroplast Protection in the Absence of Stress. The J. of Biological Chemistry, 2003, v. 278, no. 40, pp. 38921–38926. DOI: 10.1074/jbc.M304987200
- [44] McKersie B.D., Murnaghan J., Jones K.S., Bowley S.R. Iron-superoxide dismutase expression in transgenic alfalfa increases winter survival without a detectable increase in photosynthetic oxidative stress tolerance. Plant Physiol., 2000, v. 122(4), pp. 1427–1437. DOI: 10.1104/pp.122.4.1427
- [45] Hell R., Stephan U.W. Iron uptake, trafficking and homeostasis in plants. Planta, 2003, v. 216(4), pp. 541–551. DOI: 10.1007/s00425-002-0920-4
- [46] Briat J.F., Duc C., Ravet K., Gaymard F. Ferritins and iron storage in plants. Biochim Biophys Acta, 2010, v. 1800(8), pp. 806–814. DOI: 10.1016/j.bbagen.2009.12.003

- [47] Yakovleva O.V. *Fitotoksichnost' ionov alyuminiya* [Phytotoxicity of aluminum ions]. *Trudy po prikladnoy botanike, genetike i selektsii* [Works on applied botany, genetics and breeding], 2018, no. 179 (3), pp. 315–331. DOI: 10.30901/2227-8834-2018-3-315-331
- [48] Bose J., Babourina O., Shabala S., Rengel Z. Low-pH and aluminium resistance in *Arabidopsis* correlates with high cytosolic magnesium content and increased magnesium uptake by plant roots. *Plant Cell Physiol*, 2013, v. 54, pp. 1093–1104. DOI: 10.1093/pcp/pct064
- [49] Markovskaya E.F., Terebova E.N., Androsova V.I., Pavlova M.A. Ecological and physiological features of metal accumulation of halophytic plants on the White Sea coast. *Handbook of bioremediation: Physiological, Molecular and Biotechnological Interventions*. Eds. M. Hasanuzzaman, M. Narasimha V. Prasad. Academic Press, 2020, pp. 295–327. DOI: 10.1016/b978-0-12-819382-2.00019-3
- [50] Amosova N.V., Synzynys B.I. *O kombinirovannom deystvii alyuminiya i zheleza na prorostki yachmenya i pshenitsy* [On the combined effect of aluminum and iron on barley and wheat seedlings]. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya* [Agricultural biology], 2005, no. 1, pp. 46–49.
- [51] Amosova N.V., Synzynys B.I., Ul'yanenko L.N. *Chuvstvitel'nost' razlichnykh sortov yachmenya k deystviyu alyuminiya i zheleza* [Sensitivity of different varieties of barley to the effects of aluminum and iron]. *Nauka sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva i obrazovaniya* [Science of agricultural production and education], 2004, pp. 6–8.
- [52] Bose J., Babourina O., Rengel Z. Role of magnesium in alleviation of aluminium toxicity in plants. *J. Exp. Bot.*, 2011, v. 62, pp. 2251–2264. DOI: 10.1093/jxb/erq456
- [53] Moshtaghie A.A., Skillen A.W. Binding of aluminum to transferrin and lactoferrin. *Biochem Soc. Trans.*, 1986, no. 14, pp. 916–917.
- [54] Verkieij J.A.C., Schat H. Mechanisms of metal tolerance in higher plants. *Heavy metal tolerance in plants: evolutionary aspects*. Ed. A.J. Shaw. N.Y., 1990, pp. 179–193.
- [55] Aristarkhov A.N. *Sera v agroekosistemakh Rossii: monitoring sodержaniya v pochvakh i effektivnost' ee primeneniya* [Sulfur in the agroecosystems of Russia: monitoring the content in soils and the effectiveness of its application]. *Mezhdunarodnyy sel'skokhozyaystvennyy zhurnal* [International Agricultural Journal], 2016, no. 5, pp. 39–47.
- [56] Lukina N.V., Nikonov V.V. *Biogekhimicheskie tsikly v lesakh Severa v usloviyakh aerotekhnogennogo zagryazneniya. V 2-kh ch. Ch.1* [Biogeochemical cycles in the forests of the North under conditions of aerotechnogenic pollution. In 2 parts. Part 1]. *Apatity: Izd-vo Kol'skogo nauchnogo tsentra* [Publishing House of the Kola Science Center], 1996, 213 p.
- [57] *SanPiN 1.2.3685–21 «Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredi obitaniya»*. *Ofitsial'nyy internet-portal pravovoy informatsii* [Russian sanitary rules and regulations. SanPiN 1.2.3685–21 «Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans». Official Internet portal of legal information], 2021, 998 p.

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

Authors' information

Terebova Elena Nikolaevna [✉] — Cand. Sci. (Biology), Associate Professor of the Department of Botany and Plant Physiology, PetrSU, eterebova@gmail.com

Oreshnikova Natalia Vladimirovna — Cand. Sci. (Biology), Associate Professor, of the Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University, oreshinka@list.ru

Pavlova Maria Andreevna — pg. of the Department of Botany and Plant Physiology, PetrSU, mariya-leta@yandex.ru

Starodubtseva Anastasia Andreevna — Cand. Sci. (Biology), Associate Professor of the Department of Botany and Plant Physiology, PetrSU, korzunina84@mail.ru

Received 28.03.2023.

Approved after review 21.06.2023.

Accepted for publication 01.12.2023.

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 ПОСЕВНЫХ КАЧЕСТВ СЕМЯН СОСНЫ БАНКСА (*PINUS BANKSIANA* LAMB.), ПРОИЗРАСТАЮЩЕЙ НА ПОЧВАХ ЕГОРЬЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ФОСФОРИТОВ, ТРАНСФОРМИРУЮЩИХСЯ ПОД ВЛИЯНИЕМ ПОЖАРОВ

С.Б. Васильев[✉], М.А. Лавренов, О.В. Кормилицына

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1
svasilyev@mgul.ac.ru

Приведены результаты анализа химических свойств верхних супесчаных горизонтов слабообразованных почв Егорьевского месторождения фосфоритов. Представлены значения мощности лесной подстилки, плотности и водопроницаемости данных почв. Охарактеризована ценность сосны Банкса как породы, используемой в целях рекультивации в условиях европейской части России. Выявлены достаточно высокие посевные качества семян сосны Банкса, определенные по их всхожести. Указана возможность использования этих семян для создания региональной семенной базы. Проанализированы морфологические признаки одно- и двухлетних семян (шишек) сосны Банкса. Установлены более высокие значения всхожести семян, собранных с однолетних шишек. Рекомендуется дальнейшее проведение исследований посевных качеств данного вида для последующей интродукции.

Ключевые слова: сосна Банкса, посевные качества семян, рекультивация земель, Егорьевское месторождение фосфоритов

Ссылка для цитирования: Васильев С.Б., Лавренов М.А., Кормилицына О.В. Исследование посевных качеств семян сосны Банкса (*Pinus Banksiana* Lamb.), произрастающей на почвах Егорьевского месторождения фосфоритов, трансформирующихся под влиянием пожаров // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 2. С. 70–80. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-70-80

Сосна Банкса является одной из самых важных коммерческих пород деревьев в Канаде и районе Великих озер США — штаты Висконсин, Пенсильвания, Огайо, Нью-Йорк, Миннесота, Мичиган, Индиана и Иллинойс. Она используется в строительстве, для заготовки балансовой древесины, железнодорожных шпал, столбов и свай [1–3]. Устойчивость сосны Банкса к поражению различными вредителями, быстрый рост в молодом возрасте, хорошая приживаемость на бедных почвах и легкость самовоспроизводства делают ее пригодной для выращивания в целях получения древесины при коротком обороте рубки. Кроме того, сосна Банкса применяется для экстракции эфирных масел, получения ароматических агентов, в частности в парфюмерии, косметологии, а также при производстве чистящих средств [4].

Включение интродуцентов в ассортимент лесных древесных пород при искусственном лесовыращивании — сложный и ответственный шаг, имеющий большое значение при решении лесохозяйственных проблем в области повышения продуктивности лесов и рекультивации ландшафтов [5–13]

Введение сосны Банкса при лесомелиорации Егорьевского месторождения фосфоритов

(Московская обл.) обусловлено ее ботанической характеристикой — высокой неприхотливостью, легкой приспособленностью к климатическим и почвенным условиям, хорошим ростом на бедных почвах, непригодных для выращивания сельскохозяйственных культур и ценных видов древесной растительности, возможностью использования крупных земельных участков, оказавшихся непродуктивными [14].

Наряду с использованием на нарушенных землях сосна Банкса является перспективной породой для создания насаждений, выполняющих защитные функции, в частности ветрозащитных [15] и лесозащитных полос [16], в случаях, когда другие виды древесной растительности не приживаются.

Сосна Банкса не только выдерживает экстремально низкую температуру воздуха, но и процветает в суровых климатических условиях, что подтверждает ее массовое распространение в северной и западной частях Канады и в штате Миннесота [16]. Сосну Банкса можно использовать для озеленения и создания декоративных насаждений [17–24], поскольку ее деревья демонстрируют превосходную форму, исключительную компактность крон, последовательное отхождение боковых ветвей вверх от основного ствола [15].

Однако данная порода не исследуется должным образом, ей посвящено крайне недостаточно литературных работ. Исследования сосны Банкса на Дальнем Востоке, проведенные В.В. Острошенко и Л.Ю. Острошенко, указывают на возможность ее интродукции, высокую декоративность [25]. Ветвящиеся темно-красные или желто-зеленые побеги, изогнутость хвои и шишек сосны Банкса отличают ее от других видов сосны, что определяет ее в качестве ценной породы для зеленого строительства. Быстрый рост в молодом возрасте, высокая устойчивость к низким температурам и болезням, а также нетребовательность к почвенным условиям позволяют считать возможной интродукцию сосны Банкса на Дальний Восток при одновременном изучении особенностей ее выращивания [25].

Актуальность работы обусловлена необходимостью изучения техногенных ландшафтов и особенностей восстановления лесных биогеоценозов на землях, нарушенных открытой добычей фосфатного сырья и дополнительно испытывавших воздействие пожаров.

Кроме того, использование сосны Банкса при рекультивации ландшафтов не распространяется вследствие отсутствия региональных семенных баз, для создания которых необходимо определение семенной продуктивности и качества семян сосны Банкса, что также придает актуальность проведению всесторонних исследований данного вида [26].

Цель работы

Цель работы — исследование посевных качеств семян сосны Банкса, оценка влияния пожаров на свойства рекультивируемых почв Егорьевского месторождения фосфоритов.

Объект исследования

Район проведения исследований расположен в 5-м выделе 50-го квартала Хорловского участкового лесничества (Московская обл.). Насажение представлено сосной Банкса (*Pinus banksiana* Lamb.) и сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Состав древостоя 5С65С. Время посадки 1988 г. Схема посадки 2,6×1,3 м. Тип лесорастительных условий А2. Тип леса сосняк брусничный. Класс пожарной опасности II.

Для оценки пирогенного воздействия на почвы и их свойства были заложены три пробные площадки (ПП) на следующих трех участках:

- 1) не испытывавшем пирогенного воздействия (ПП № 3);
- 2) испытывавшем беглый низовой пожар в 2015 г. (ПП № 1);
- 3) испытывавшем низовой пожар в 2005 г. (ПП № 2).

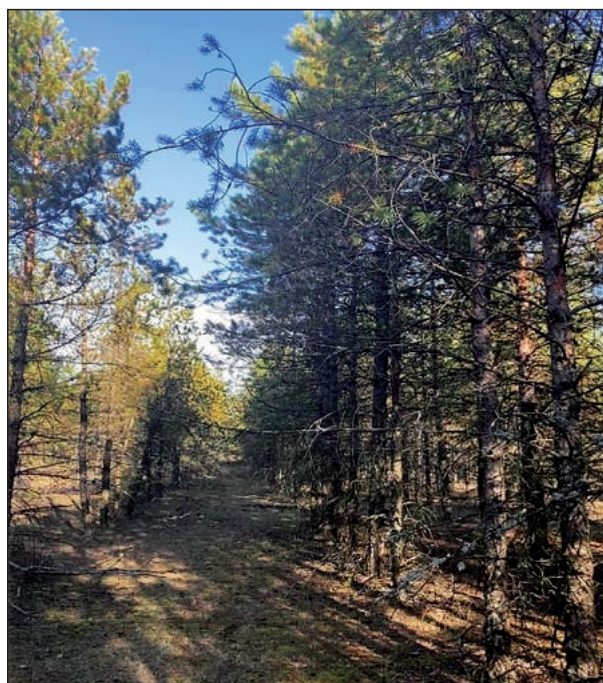


Рис. 1. Объект исследования
Fig. 1. The studied object

На всех ПП было сделано по три почвенных прикопки согласно ГОСТ 17.4.3.01–83, из которых отбирались образцы почв для изучения их физических и химических свойств.

Материалы и методы

Всхожесть и энергию прорастания семян сосны Банкса определяли по ГОСТ 13056.6–97 Семена деревьев и кустарников. Метод определения всхожести. Энергию прорастания семян определяли на 7-й день, всхожесть — на 15-й день.

Для проращивания семян использовали стол Якобсена, состоящий из большой ванны, наполненной водой. Количество воды проверяли через каждые 3...5 дней. На стол установили три пластины для проращивания, выполненные из коррозионностойкой стали, затем алюминиевую раму высотой 120 мм, что обеспечило удобство для проведения работ. Бумажные фильтры, оснащенные сердечниками, раскладывали на столе таким образом, чтобы сердечники входили в отверстия пластин для проращивания. Сердечники впитывают в себя воду и поддерживают фильтрующую бумагу во влажном состоянии. Дозатором, подключенным к отсосу, подцепляли семена и клали их на бумажный фильтр. Колоколообразные чаши устанавливали на каждый бумажный фильтр (рис. 2).

Семена сосны Банкса проращивали при переменной температуре. Воду в аппаратах ежедневно в течение 6 ч подогревали с 24 до 36 °С, вследствие чего температура ложа повышалась с 20 до 30 °С. В оставшееся время вода в аппа-

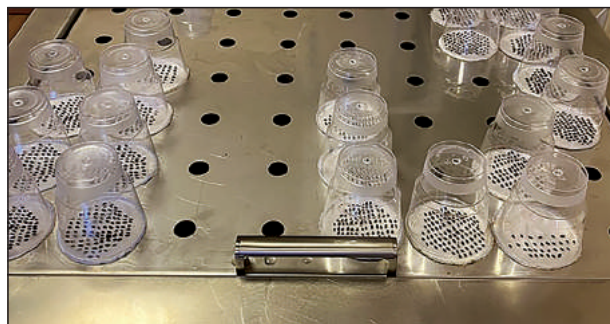


Рис. 2. Определение всхожести семян сосны Банкса
Fig. 2. Progenity test of Jack Pine seeds

ратах остывала с 36 до 24 °С, эта температура поддерживалась на таком уровне, соответственно, температура ложа — на уровне 20 °С.

Учет результатов проращивания проводили на 3-й, 5, 7, 10, 15-й дни. Началом проращивания считался день, следующий за днем раскладки семян. Каждый день учета нормально проросшие и явно загнившие семена удаляли с ложа и отмечали это в карточке анализа. В день окончательного учета всхожести оставшиеся на ложе семена отдельно по каждой пробе взрезывали вдоль зародыша, определяли число здоровых, ненормально проросших, запаренных, беззародышевых, пустых, зараженных энтомофагами и результаты отмечали в карточке анализа. По окончании проращивания проводили учет всхожести семян, результаты заносили в карточку анализа. По результатам проращивания определяют энергию прорастания и всхожесть для каждой пробы (100 шт.) семян отдельно. Энергию прорастания и всхожесть партии семян устанавливали как среднее арифметическое проращивания отдельных проб семян и выражали в процентах с точностью до целых чисел. Техническую всхожесть определяли как процентное отношение числа проросших семян к числу семян, заложенных на проращивание.

По почвенным прикопкам изучали морфологические свойства генетических горизонтов почвы.

Из физических свойств почвы были изучены плотность и водопроницаемость. Плотность почвы при полевом исследовании определяли путем отбора почвенных образцов специальным цилиндрическим буром из стенок почвенного разреза (методом режущего кольца) в пятикратной повторности. Водопроницаемость верхних минеральных горизонтов в полевых условиях определяли методом трубок с переменным напором воды [27]. Для этого использовали металлические трубки высотой 13 см (3 см трубки погружали в почву, 10 см составляла высота столба воды). Водопроницаемость почвы определяли в 10-кратной повторности.

В ходе исследований определили следующие химические показатели:

– рН водной и солевой суспензии — потенциометрическим методом;

– гидролитическую кислотность почвы (H_p , ммоль/100 г) — по методу Каппена в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26212–91) (ГУ «Центральный научно-исследовательский институт агрохимического обслуживания сельского хозяйства);

– сумму поглощенных оснований (S , ммоль/100 г) — по методу Каппена (ГОСТ 7821–2020);

– емкость катионного обмена (ЕКО, ммоль/100 г) — по методу Бобко — Аскинази — Алешина в модификации ЦИНАО (ГОСТ 17.4.4.01–84. Группа Т58);

– степень насыщенности почв основаниями (V , %) — расчетным методом;

– содержание подвижных соединений фосфора и калия — по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО (P_2O_5 , K_2O , мг/100 г почвы) (ГОСТ Р 54650–2011);

– содержание аммиачного (NH_4^+ , мг/кг) и нитратного (NO_3^- , мг/кг) азота — фотокolorиметрическим методом;

– содержание органического углерода (С, %) — по методу Тюрина.

При математической обработке материала были применены методы вариационной статистики — рассчитаны основные описательные статистики (для уровня значимости 0,05):

– средняя арифметическая величина M ;

– ошибка средней арифметической величины признака m ;

– среднее квадратическое отклонение для выборки S ;

– коэффициент вариации V , %;

– доверительный интервал для 0,05 уровня значимости;

– показатель точности опыта P , %.

Оценка коэффициента вариации проводилась по методике С.А. Мамаева. Точность опыта считается удовлетворительной в лесохозяйственных исследованиях, если она не превышает 5 %. При значениях точности опыта свыше 5 % рекомендуется заново заложить опыт, при этом необходимо увеличить объем выборки и повысить точность измерений.

Результаты и обсуждение

На промышленных отвалах Егорьевского месторождения фосфоритов в течение 35 лет сформировалась слаборазвитая супесчаная почва. Диагностической особенностью песчаных отложений промышленных отвалов в его пределах является выраженная антропогенная слоистость отложений, вызванная многократным переотложением исходной породы под действием технологической переработки фосфоритного сырья. Профиль слаборазвитой почвы представляет собой песчаные

отложения, покрытые лесной подстилкой различной мощности, под которой залегает песчаная порода, слабо затронутая почвообразовательным процессом. Выделяются следующие горизонты:

О — 0...5 см (мощность 5 см) — лесная подстилка (войлок), хорошо сформированный слой органических остатков разной степени разложения; свежий, рыхлый, темно-серый.

Chf — 5...12 см (мощность 7 см) — почвообразующая порода, затронутая почвообразованием в недостаточной степени, для того чтобы идентифицировать генетический горизонт; свежий, рыхлый, серовато-желтый, перегнойный материал локализован преимущественно в слое до 10 см; супесчаный гранулометрический состав с наличием железистых пленок (единичные пятна); структура неустойчивая комковатая, переход в горизонт D волнистый слабозаметный.

Т а б л и ц а 1

Характеристика лесной подстилки Specifics of forest litter

| Параметр | ПП № 1 | ПП № 2 | ПП № 3 |
|--|-------------|-------------|-------------|
| Средняя арифметическая величина признака и ее ошибка ($M \pm m$), см | 1,00 ± 0,10 | 1,33 ± 0,36 | 2,00 ± 0,14 |
| Среднее квадратическое отклонение для выборки (S), см | 0,2 | 0,4 | 0,2 |
| Показатель точности опыта (P), % | 10,0 | 13,7 | 3,5 |
| Коэффициент вариации (V), %; | 22,4 | 30,7 | 7,9 |

Т а б л и ц а 2

Характеристика плотности почвы Specifics of soil density

| Параметр | Прикопки | | | | | | | | |
|---|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | ПП № 1 | | | ПП № 2 | | | ПП № 3 | | |
| | 1.1 | 1.2 | 1.3 | 2.1 | 2.2 | 2.3 | 3.1 | 3.2 | 3.3 |
| Средняя арифметическая величина признака и ее ошибка ($M \pm m$), г/см ³ | 1,23 ± 0,06 | 1,29 ± 0,03 | 11,29 ± 0,03 | 1,37 ± 0,01 | 1,46 ± 0,01 | 1,34 ± 0,01 | 1,45 ± 0,02 | 1,35 ± 0,03 | 1,46 ± 0,02 |
| Среднее квадратическое отклонение для выборки (S), г/см ³ | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,03 | 0,02 | 0,04 | 1,35 ± 0,03 | 0,1 | 0,04 |
| Показатель точности опыта (P), % | 4,6 | 2,4 | 2,5 | 1,0 | 0,7 | 1,1 | 1,5 | 2,5 | 1,0 |
| Коэффициент вариации (V), %; | 11,3 | 5,9 | 6,1 | 2,5 | 1,6 | 2,7 | 3,6 | 6,1 | 2,5 |

D — 12...250 см — подстилаящая порода, песчаный, единичные включения конкреций апатита неправильной формы.

Наименьшие значения мощности лесной подстилки и плотности почвы; и увеличение водопроницаемости почвы наблюдаются на участке, подвергшемся в 2015 г. низовому пожару (табл. 1–3).

Из-за высокой вариабельности морфометрических показателей показатель точности опыта в отдельных случаях выходил за пределы 5 %.

Анализ химических свойств верхних супесчаных горизонтов слаборазвитых почв постпирогенных участков показал, что существенные различия с контролем наблюдаются в содержании органического углерода; аммиачного и нитратного азота (табл. 4).

Значительных изменений кислотности, содержания доступных форм фосфора и калия в почве на постпирогенных участках по сравнению с контролем не выявлено.

Таким образом, почвенные исследования показали, что на промышленных отвалах Егорьевского

Т а б л и ц а 3

Характеристика водопроницаемости почв Specifics of soil water permeability

| Параметр | ПП № 1 | ПП № 2 | ПП № 3 |
|--|-------------|-------------|-------------|
| Средняя арифметическая величина признака и ее ошибка ($M \pm m$), см/мин | 1,73 ± 0,06 | 1,53 ± 0,03 | 0,73 ± 0,07 |
| Среднее квадратическое отклонение для выборки (S), см/мин | 0,2 | 0,1 | 0,2 |
| Показатель точности опыта (P), % | 3,7 | 2,2 | 9,0 |
| Коэффициент вариации (V), %; | 10,4 | 6,1 | 25,6 |

месторождения фосфоритов сформировалась супесчаная слаборазвитая почва. Низовой пожар воздействовал прежде всего на содержание в ней органического вещества.

Т а б л и ц а 4

Значения показателей химических свойств почвы

Values of soil chemical properties

| Показатель | pH водной суспензии (pH _{H2O}) | pH солевой суспензии (pH _{KCl}) | Гидролитическая кислотность почвы (H), ммоль/100 г | Сумма поглощенных оснований (S), ммоль/100 г | Емкость катионного обмена (ЕКО), ммоль/100 г | Степень насыщенности почв основаниями (V), % | Содержание аммиачного и нитратного азота (NO ₃ ⁻ + NH ₄ ⁺), мг/кг | Содержание подвижных соединений фосфора (P ₂ O ₅), мг/100 г почвы | Содержание подвижных соединений калия (K ₂ O), мг/100 г почвы | Содержание органического углерода (С), % |
|--|--|---|--|--|--|--|--|--|--|--|
| ПП № 1 | | | | | | | | | | |
| Средняя арифметическая величина признака и ее ошибка ($M \pm m$) | 5,86 ± 0,17 | 5,34 ± 0,14 | 1,54 ± 0,01 | 4,00 ± 0,11 | 5,54 ± 0,1 | 72,16 ± 0,7 | 0,46 ± 0,01 | 8,07 ± 0,14 | 4,00 ± 0,06 | 0,39 ± 0,01 |
| Среднее квадратическое отклонение для выборки (S) | 0,4 | 0,3 | 0,03 | 0,2 | 0,2 | 1,6 | 0,02 | 0,3 | 0,1 | 0,02 |
| Показатель точности опыта (P), % | 3,0 | 2,6 | 0,9 | 2,7 | 1,8 | 1,0 | 2,0 | 1,7 | 1,5 | 2,2 |
| Коэффициент вариации (V), % | 6,6 | 5,8 | 1,9 | 6,1 | 3,9 | 2,2 | 4,4 | 3,8 | 3,4 | 4,9 |
| ПП № 2 | | | | | | | | | | |
| Средняя арифметическая величина признака и ее ошибка ($M \pm m$) | 6,4 ± 0,16 | 5,7 ± 0,25 | 1,43 ± 0,16 | 4,3 ± 0,09 | 5,73 ± 1,11 | 74,94 ± 1,3 | 0,67 ± 0,01 | 7,4 ± 0,67 | 4,0 ± 0,2 | 0,65 ± 0,02 |
| Среднее квадратическое отклонение для выборки (S) | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 1,5 | 0,01 | 0,2 | 0,2 | 0,01 |
| Показатель точности опыта (P), % | 0,9 | 1,6 | 4,0 | 0,7 | 1,4 | 0,9 | 0,7 | 1,8 | 1,8 | 1,0 |
| Коэффициент вариации (V), % | 2,0 | 3,6 | 8,9 | 1,6 | 3,0 | 2,1 | 1,6 | 4,0 | 4,0 | 2,3 |
| ПП № 3 | | | | | | | | | | |
| Средняя арифметическая величина признака и ее ошибка ($M \pm m$) | 6,12 ± 0,42 | 5,32 ± 0,55 | 1,79 ± 0,06 | 5,05 ± 0,06 | 6,84 ± 0,07 | 73,87 ± 0,74 | 1,1 ± 0,08 | 7,82 ± 0,19 | 4,0 ± 0,16 | 0,82 ± 0,13 |
| Среднее квадратическое отклонение для выборки (S) | 0,3 | 0,4 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,6 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,1 |
| Показатель точности опыта (P), % | 2,5 | 3,7 | 1,2 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 2,5 | 0,9 | 1,5 | 2,0 |
| Коэффициент вариации (V), % | 5,6 | 8,3 | 2,6 | 1,0 | 0,8 | 0,8 | 5,6 | 1,9 | 3,3 | 12,3 |

Т а б л и ц а 5

Основные показатели роста сосны Банкса и сосны обыкновенной в смешанных культурах на Егорьевском месторождении фосфатов

Jack Pine and Scots Pine main growth parameters in mixed crops in the Egoryevsk pebble-phosphate field

| Возраст культур, лет | Состав древостоя | Высота, м | Диаметр ствола, см |
|----------------------|------------------|-----------|--------------------|
| 12 | 5С | 4,0 | 5,4 |
| | 5С ₆ | 4,45 | 6,1 |
| 21 | 5С | 6,2 | 9,5 |
| | 5С ₆ | 5,2 | 8,1 |
| 25 | 5С | 6,9 | 10,1 |
| | 5С ₆ | 5,8 | 8,5 |

Т а б л и ц а 6

Посевные качества семян сосны Банкса
Sowing qualities of Jack Pine seeds

| Семена | Энергия прорастания, % | Всхожесть, % |
|---|------------------------|--------------|
| Однолетние шишки 2009 г. | 65 | 83 |
| Двухлетние шишки 2008 г. | 14 | 26 |
| Шишки 2013 г. однолетние двухлетние | 68 | 69 |
| | 26 | 45 |
| Шишки 2014 г. однолетние двухлетние | 62 | 65 |
| | 33 | 36 |
| Шишки 2019 г. однолетние двухлетние | 64 | 70 |
| | 25 | 44 |

На участке, подвергшемся пожару в 2015 г., лесная подстилка имеет наименьшую мощность и наименьшее содержание органического углерода. Здесь были изучены показатели роста сосны Банкса (C_6) и сосны обыкновенной (C) (табл. 5).

Из табл. 5 видно, что в возрасте 12 лет на исследуемом участке сосна Банкса опережает сосну обыкновенную по высоте на 11 % и по диаметру ствола — на 13 %. Однако к 20 годам сосна Банкса начинает уступать в росте сосне обыкновенной.

Полученные нами результаты согласуются с данными других исследований, что подтверждает быстрые темпы роста сосны Банкса в молодом возрасте.

Так, например, на черноземе лесостепной станции в Липецкой области сосна Банкса до 10...12 лет являлась самой быстрорастущей из культивируемых здесь сосен. В возрасте 18...20 лет сосна обыкновенная догоняла ее по высоте и быстро перерастала. На Обливском опытном лесомелиоративном пункте в Ростовской области в смешанных культурах на легких супесях сосна Банкса до 30 лет росла так же, как и сосна обыкновенная, однако во время сильных засух массово усыхала [28].

Нами получены результаты исследования посевных качеств семян (рис. 3), собранных с однолетних и двулетних шишек сосны Банкса (табл. 6). Предварительная подготовка семян перед проращиванием не проводилась, согласно ГОСТ 13056.6–97, где указано, что в этом нет необходимости.

Некоторые авторы утверждают, что семена сосны Банкса не требуют стратификации [29, 30]. Например, Р. Линсдей [31] согласно результатам проведенных им исследований, указывает, что для сосны Банкса стратификация по итоговым числам всхожести не предпочтительна. Однако скорость прорастания оказалась статистически выше после 14-дневной стратификации со средним увеличением на 3,7 дня. Анализ данных показал, что для сосны Банкса в большинстве популяций провинции Альберта в Канаде не зафиксирован значительный период покоя. Тем не менее всегда имеется, вероятно, неглубокий покой, как указывает автор, что влияет в основном на скорость прорастания. Он может уменьшаться с помощью коротких процедур холодной стратификации. 14-дневная холодная стратификация семян сосны Банкса, по-видимому, наилучший метод для обеспечения быстрого прорастания и более равномерного возраста сеянцев, заключает Р. Линсдей [31].

Из табл. 6 видно, что всхожесть и энергия прорастания семян, собранных с однолетних шишек сосны Банкса значительно превышает всхожесть семян, извлеченных из двулетних шишек.



Рис. 3. Проростки семян сосны Банкса
Fig. 3. Jack Pine germs

Большое количество производимых семян и высокий средний процент всхожести, свойственный сосне Банкса, в некоторой степени объясняют ее широкое распространение и быстрое возобновление на гарях.

Семена в закрытых шишках сохраняют высокую всхожесть не менее 5 лет; даже через 20 лет средняя всхожесть семян может достигать 50 %, как указывают авторы при исследовании посевных качеств семян сосны Банкса в естественных условиях произрастания [32]. Так, например, С. Мерсье, Т. Мориссетт и Д. Бланшетт [33] пришли к выводу, что возраст шишки не влияет на жизнеспособность семян до 6 лет включительно. Однако в некоторых работах указывается на значительное снижение всхожести семян с увеличением возраста шишек. Наибольшую всхожесть показали семена в шишках возрастом до 4 лет [34].

В ходе проведенных нами исследований во всех случаях наблюдалось значительное снижение всхожести семян с увеличением возраста шишек.

Нами получены результаты исследования морфологических признаков шишек сосны Банкса, используемых для получения семян (табл. 7).

Таким образом, на нарушенных землях Егорьевского месторождения фосфоритов у сосны Банкса формируются шишки нормального присутствующего данному виду размера — от 3,5 до 5 см длиной, от 2 до 2,5 см шириной. Однако с увеличением возраста древостоя наблюдается уменьшение массы шишек и числа семян в шишках сосны Банкса.

Биометрические показатели шишек сосны Банкса

Biometric indicators of Jack Pine cones

| Семена | Длина, см | Диаметр, см | Масса шишки, г | Масса шишки после сушки, г | Количество семян в шишке, шт. |
|--------------------------|-----------|-------------|----------------|----------------------------|-------------------------------|
| Однолетние шишки 2009 г. | 4,79 | 1,99 | 10,1 | 7,66 | 31,9 |
| Двухлетние шишки 2008 г. | 4,63 | 2,08 | 9,27 | 7,95 | 42,5 |
| Шишки 2013 г. | | | | | |
| однолетние | 4,26 | 2,10 | 8,62 | 7,40 | 15,6 |
| двухлетние | 4,10 | 1,97 | 6,76 | 5,71 | 8,62 |
| Шишки 2014 г. | | | | | |
| однолетние | 4,30 | 1,83 | 6,80 | 5,68 | 16,45 |
| двухлетние | 4,38 | 1,91 | 6,95 | 6,25 | 16,41 |
| Шишки 2019 г. | | | | | |
| однолетние | 4,49 | 2,05 | 8,19 | 7,48 | 20,55 |
| двухлетние | 3,54 | 1,72 | 5,03 | 4,19 | 10,89 |

Эти результаты в некоторой степени подтверждают теорию о том, что при наличии ограниченных ресурсов растение может направить имеющиеся ресурсы на производство меньшего количества более крупных семян или большего количества более мелких семян [35].

Выводы

Выявлены достаточно высокие посевные качества семян сосны Банкса, что указывает на возможность ее дальнейшего использования при рекультивации техногенных ландшафтов.

Семена, полученные из насаждений сосны Банкса, адаптированной к условиям Егорьевского месторождения фосфоритов, можно использовать для создания региональной семенной базы, используемой для выращивания лесных культур при дальнейшей рекультивации земель на территории европейской части России.

Для сбора семян сосны Банкса, произрастающей в пределах Егорьевского месторождения фосфатов, следует использовать однолетние шишки, всхожесть которых на 138...319 % выше по сравнению с двухлетними.

Пройденный пожар не оказал существенного влияния на последующую всхожесть семян сосны Банкса — через 5 лет после пожара всхожесть оказалась не ниже, чем в 2013 и 2014 гг., что объясняется быстрым размножением сосны Банкса после вырубок и пожаров.


Список литературы

- [1] Hosie R.C. Native trees of Canada. Ontario: 8th ed. Fitzhenry & Whiteside Ltd, 1979, p. 380.
- [2] Cayford J.H., McRae D.J. The ecological role of fire in jack pine forests // The role of fire in northern circumpolar ecosystems. Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd., 1983, pp. 183–199.
- [3] Law K.N., Valade J.L. Status of the utilization of jack pine (*Pinus banksiana*) in the pulp and paper industry // Canadian J. of Forest Research 24, 1994, pp. 2078–2084

- [4] Maries R., Clavelie C., Monteleone L., Tays N., Burns D. Aboriginal plant use in Canada's northwest boreal forest // Natural Resources Canada, Canadian Forest Service. Vancouver: University of British Columbia Press, 2000, 368 p.
- [5] Братилова Н.П., Матвеева Р.Н., Пастухова А.М., Шишова Ю.С., Гришлова М.В., Борчакова М.С., Коновалова Д.А. Интродукция сосны кедровой корейской на юге средней Сибири // Хвойные бореальной зоны, 2019. Т. 37, № 3–4. С. 209–213.
- [6] Гаврилова О.И., Грязькин А.В., Кабонен А.В., Иоффе А.О. Оценка результатов интродукции сосны кедровой сибирской в условиях Южной Карелии // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование, 2022. № 2(54). С. 6–14.
- [7] Неженцева Т.В. Итоги и перспективы интродукции рододового комплекса *Pinus L.* в Ставропольском ботаническом саду // Вестник АПК Ставрополя, 2019. № 2. С. 70–73.
- [8] Кищенко И.Т. Сезонное развитие и перспективность интродуцированных видов *Pinus L.* в таежной зоне (Карелия) // Вестник Пермского университета. Серия Биология, 2021. № 3. С. 149–157.
- [9] Кищенко И.Т. Оценка перспективности интродукции видов *Abies Mill.* в таежной зоне (Карелия) // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки, 2020. № 3. С. 42–55
- [10] Есичев А.О., Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П., Кентбаев Е.Ж., Кентбаева Б.А. Внутривидовая изменчивость состояния ксилемы побегов лиственницы сибирской при интродукции в Нижегородскую область // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование, 2021. № 3 (51). С. 28–40.
- [11] Гончарова О.А., Полоскова Е.Ю., Зотова О.Е., Липпонен И.Н. Некоторые вопросы оценки жизнеспособности лиственных древесных интродуцентов на Кольском Севере // Вестник Иркутской государственной сельскохозяйственной академии, 2020. № 97. С. 13–23.
- [12] Кищенко И.Т., Тренин В.В. Развитие мужского гаметофита интродуцированных видов ели (*Picea A. Dietr.*) в таежной зоне (Карелия) // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование, 2020. № 1 (45). С. 44–50.

- [13] Кузьмина Н.М. Декоративные древесные интродуценты в санаторно-курортной зоне на примере санатория «Металлург», г. Ижевск // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии, 2019. № 4. С. 53–56
- [14] Safety Assessment of Transgenic Organisms, Volume 3: OECD Consensus Documents, Harmonisation of Regulatory Oversight in Biotechnology. Paris: OECD Publishing, 2010, 324 p.
- [15] Sprackling John A., Read. Ralph A. Jack pine provenance study in eastern Nebraska. Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, U.S. Department of Agriculture, 1975, p. 8.
- [16] Elwes H.J., Henry A. The Trees of Great Britain and Ireland // Cambridge Library Collection – Botany and Horticulture. Cambridge: Cambridge University Press, 2014, 456 p.
- [17] Мкртчян М.А., Путенихин В.П. Биологические особенности сосны Банкса, веймутовой и желтой при интродукции в Башкирском Предуралье // Вестник Челябинского государственного университета, 2013. № 7. С. 185–186.
- [18] Шошин В.И., Маркина З.Н., Приставка И.А. Влияние лесорастительных свойств дерново-подзолистых почв зеленой зоны поселений Брянской области на рост сосновых видов // Лесотехнический журнал, 2014. № 1. С. 103–112.
- [19] Неженцева Т.В. Итоги и перспективы интродукции родового комплекса *Pinus L.* в Ставропольском ботаническом саду // Вестник АПК Ставрополя, 2019. № 2. С. 70–73.
- [20] Манаенков А.С., Ложкина О.В. Повышение эффективности лесной мелиорации эродированных земель северной лесостепи // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование, 2018. № 2 (38). С. 74–83.
- [21] Мамаев А.А., Жемкова Е.С. Выращивание сеянцев сосны Банкса в ботаническом саду-институте ПГТУ // Научные вести, 2020. № 1(18). С. 80–83.
- [22] Габеев В.Н., Габеева З.П. Качество шишек и семян сосны Банкса в дендрарии Северо-Осетинского университета в г. Владикавказе // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений, 2009. Т. XII. С. 20–24.
- [23] Торчик В.И., Кондратов Е.В. Жизнеспособность пыльцы спонтанных соматических мутаций пихты корейской (*Abies koreana* Wils.) и сосны Банкса (*Pinus banksiana* Lamb.) // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия биологических наук, 2016. № 2. С. 22–26.
- [24] Путенихин В.П., Шарипова М.Ю., Дубовик И.Е., Хазихметов Р.М. Лесоводственные особенности некоторых североамериканских сосен при интродукции в Башкирском Предуралье // Естественные и технические науки, 2019. № 10(136). С. 177–180.
- [25] Острошенко В.В., Острошенко Л.Ю. Влияние стимуляторов на всхожесть семян и рост сеянцев сосны Банкса (*Pinus banksiana* Lamb.) // Вестник Красноярского государственного аграрного университета, 2011. № 11. С. 85–92.
- [26] Репин Е.Н., Попков Б.В. Биологические исследования на Горнотаежной станции. Владивосток: Изд-во Горнотаежной станции ДВО РАН, 2004. Вып. 9. С. 124–135.
- [27] Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
- [28] Ревяко И.И. Лесные культуры. Проектирование и создание лесных насаждений. Новочеркасск: Новочеркасская ГМА, 2013. 167 с.
- [29] de Groot W.J., Bothwell P.M., Taylor S.W., Wotton B.M., Stocks B.J., Alexander M.E. Jack pine regeneration and crown fires // Canadian J. of Forest Research 34 (8), 2004, pp. 1634–1641.
- [30] Yeatman C.W. The genetic basis of jack pine management. Jack Pine Symposium. Canadian Forest Service, Great Lakes Forest Research Centre, COFJRC Symposium Proceedings, 1984, pp. 1–12.
- [31] Lindsay R. Seed Matters 5: Lodgepole and Jack Pine Seed Treatments for Greenhouse Sowing. Alberta Agriculture and Forestry, Government of Alberta, 2020, pp. 1–9.
- [32] Cayford J.H., McRae D.J. The ecological role of fire in jack pine forests // Role of Fire in Northern Circumpolar Ecosystems. New York, NY: John Wiley and Sons, 322 p.
- [33] Mercier S., Morissette T., Blanchette D. Evaluation des cônes de pin gris en vue de la récolte de semences de qualité. Gouvernement du Québec, Ministère des Forêts, Direction de la recherche, 1991, pp. 1–42.
- [34] Ahlgren C.E. Some effects of prescribed burning on Jack Pine reproduction in northeastern Minnesota. University of Minnesota, Agricultural Experiment Station, Miscellaneous Report 94, Forestry Series 5, 1970, 16 p.
- [35] Harper J., Lovell E., Moore K. The shapes and sizes of seeds // Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 1970, pp. 327–356.

Сведения об авторах

Васильев Сергей Борисович  — канд. с.-х. наук, зав. кафедрой ЛТ-1, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), svasilyev@mgul.ac.ru

Лавренов Максим Александрович — канд. с.-х. наук, доцент кафедры ЛТ-1, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), lavrenov@mgul.ac.ru

Кормилицына Ольга Васильевна — канд. с.-х. наук, доцент кафедры ЛТ-1, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), ovkorm68@yandex.ru

Поступила в редакцию 26.06.2023.

Одобрено после рецензирования 13.12.2023.

Принята к публикации 06.02.2024.

PROGENY TEST OF JACK PINE (*PINUS BANKSIANA* LAMB.) SEEDS GROWING IN EGORYEVSK PEBBLE-PHOSPHATE FIELD TRANSFORMED UNDER PYROGENIC FACTOR

S.B. Vasiliev , **M.A. Lavrenov**, **O.V. Kormilitsyna**

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

svasilyev@mgul.ac.ru

The article presents the study results of Jack pine growing on the disturbed soils of the Egoryevsk pebble-phosphate field in the European part of Russia. The Jack pine is a valuable species for recultivation purposes in the conditions of the European part of Russia, in this regard, the progeny tests of this species is necessary for its further introduction. As a result of determining the germination ability of seeds, sufficiently high germinative capacity was revealed, which indicates the possibility of using them to create a regional seed base.

Keywords: Jack pine, germination ability of seeds, land recultivation, Egoryevsk pebble-phosphate field

Suggested citation: Vasiliev S.B., Lavrenov M.A., Kormilitsyna O.V. *Issledovanie posevnykh kachestv semyan sosny Banksa (Pinus Banksiana Lamb.), proizrastayushchey na pochvakh Egor'evskogo mestorozhdeniya fosforitov, transformiruyushchikhsya pod vliyaniem pozharov* [Progeny test of Jack pine (*Pinus Banksiana* Lamb.) seeds growing in Egoryevsk pebble-phosphate field transformed under pyrogenic factor]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 2, pp. 70–80. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-70-80

References

- [1] Hosie R.C. Native trees of Canada. Ontario: 8th ed. Fitzhenry & Whiteside Ltd, 1979, p. 380.
- [2] Cayford J.H., McRae D.J. The ecological role of fire in jack pine forests. The role of fire in northern circumpolar ecosystems. Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd., 1983, pp. 183–199.
- [3] Law K.N., Valade J.L. Status of the utilization of jack pine (*Pinus banksiana*) in the pulp and paper industry. *Canadian J. of Forest Research* 24, 1994, pp. 2078–2084
- [4] Maries R., Clavelie C., Monteleone L., Tays N., Burns D. Aboriginal plant use in Canada's northwest boreal forest. *Natural Resources Canada, Canadian Forest Service*. Vancouver: University of British Columbia Press, 2000, 368 p.
- [5] Bratilova N.P., Matveeva R.N., Pastukhova A.M., Shimova Yu.S., Grishlova M.V., Borchakova M.S., Konovalova D.A. *Introduktsiya sosny kedrovoy koreyskoy na yuge sredney Sibiri* [Introduction of Korean cedar pine in the south of Central Siberia]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Conifers of the boreal zone], 2019, t. 37, no. 3–4, pp. 209–213.
- [6] Gavrilova O.I., Gryaz'kin A.V., Kabonen A.V., Ioffe A.O. *Otsenka rezul'tatov introduktsii sosny kedrovoy sibirskoy v usloviyakh Yuzhnoy Karelii* [Evaluation of the results of the introduction of Siberian cedar pine in the conditions of South Karelia]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta*. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie [Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Forest. Ecology. Nature Management], 2022, no. 2(54), pp. 6–14.
- [7] Nezhentseva T.V. *Itogi i perspektivy introduktsii rodovogo kompleksa Pinus L. v Stavropol'skom botanicheskom sadu* [Results and prospects of the introduction of the *Pinus L.* generic complex in the Stavropol Botanical Garden]. *Vestnik APK Stavropol'ya* [Bulletin of the AIC of Stavropol], 2019, no. 2, pp. 70–73.
- [8] Kischenko I.T. *Sezonnoe razvitiye i perspektivnost' introdutsirovannykh vidov Pinus L. v taezhnoy zone (Kareliya)* [Seasonal development and prospects of introduced *Pinus L.* species in the taiga zone (Karelia)]. *Vestnik Permskogo universiteta*. Seriya Biologiya [Bulletin of Perm University. Series Biology], 2021, no. 3, pp. 149–157.

- [9] Kischenko I.T. *Otsenka perspektivnosti introduktsii vidov Abies Mill. v taezhnoy zone (Kareliya)* [Assessment of the prospects for the introduction of *Abies Mill.* species. in the taiga zone (Karelia)] *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Estestvennye nauki* [News of higher educational institutions. Volga region. Natural Sciences], 2020, no. 3, pp. 42–55.
- [10] Esichev A.O., Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Kentbaev E.Zh., Kentbaeva B.A. *Vnutrividovaya izmenchivost' sostoyaniya ksilemy pobegov listvennitsy sibirskoy pri introduktsii v Nizhegorodskuyu oblast'* [Intraspecific variability of the xylem state of Siberian larch shoots during introduction to the Nizhny Novgorod region]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* [Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Forest. Ecology. Nature Management], 2021, no. 3 (51), pp. 28–40.
- [11] Goncharova O.A., Poloskova E.Yu., Zotova O.E., Lipponen I.N. *Nekotorye voprosy otsenki zhiznesposobnosti listvennykh drevesnykh introdutsentov na Kol'skom Severe* [Some issues of assessing the viability of deciduous tree introducers in the Kola North]. *Vestnik Irkutskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* [Bulletin of the Irkutsk State Agricultural Academy], 2020, no. 97, pp. 13–23.
- [12] Kischenko I.T., Trenin V.V. *Razvitie muzhskogo gametofita introdutsirovannykh vidov eli (Picea A. Dietr.) v taezhnoy zone (Kareliya)* [Development of male gametophyte of introduced spruce species (*Picea A. Dietr.*) in the taiga zone (Karelia)]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* [Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Forest. Ecology. Nature Management], 2020, no. 1(45), pp. 44–50.
- [13] Kuzmina N.M. *Dekorativnye drevesnye introdutsenty v sanatorno-kurortnoy zone, na primere sanatoriya Metallurg, g. Izhevsk* [Decorative wood introducers in the sanatorium-resort area, on the example of the Metallurg sanatorium, Izhevsk]. *Vestnik Izhevskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* [Bulletin of the Izhevsk State Agricultural Academy], 2019, no. 4, pp. 53–56.
- [14] Safety Assessment of Transgenic Organisms, Volume 3: OECD Consensus Documents, Harmonisation of Regulatory Oversight in Biotechnology, OECD Publishing, Paris, 2010, 324 p.
- [15] Sprackling John A., Read. Ralph A. Jack pine provenance study in eastern Nebraska. Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, U.S. Department of Agriculture, 1975, p. 8.
- [16] Elwes H.J., Henry A. *The Trees of Great Britain and Ireland*. Cambridge Library Collection – Botany and Horticulture. Cambridge: Cambridge University Press, 2014, 456 p.
- [17] Mkrtychyan M.A., Putenikhin V.P. *Biologicheskie osobennosti sosny Banksa, veymutovoy i zheltoy pri introduktsii v Bashkirskom Predural'e* [Biological features of Banks, Weimut and yellow pine during introduction in the Bashkir Urals]. *Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Chelyabinsk State University], 2013, no. 7, pp. 185–186.
- [18] Shoshin V.I., Markina Z.N., Pristavko I.A. *Vliyanie lesorastitel'nykh svoystv dernovo-podzolistykh pochv zelenoy zony poseleniy Bryanskoy oblasti na rost sosnovykh vidov* [Influence of forest-growing properties of sod-podzolic soils of the green zone of settlements of the Bryansk region on the growth of pine species]. *Lesotekhnicheskiy zhurnal* [Forestry Journal], 2014, no. 1, pp. 103–112.
- [19] Nezhentseva T.V. *Itogi i perspektivy introduktsii rodovogo kompleksa Pinus L. v Stavropol'skom botanicheskom sadu* [Results and prospects of the introduction of the *Pinus L.* generic complex in the Stavropol Botanical Garden] *Vestnik APK Stavropol'ya* [Bulletin of the AIC of Stavropol], 2019, no. 2, pp. 70–73.
- [20] Manaenkov A.S., Lozhkina O.V. *Povyshenie effektivnosti lesnoy melioratsii erodirovannykh zemel' Severnoy lesostepi* [Improving the efficiency of forest reclamation of eroded lands of the Northern forest Steppe]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* [Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Forest. Ecology. Nature Management], 2018, no. 2 (38), pp. 74–83.
- [21] Mamaev A.A., Zhemkova E.S. *Vyrashchivanie seyantsev sosny Banksa v botanicheskom sadu-institute PGU* [Growing seedlings of Banks pine in the Botanical garden-Institute of PSTU]. *Nauchnye vesti* [Scientific News], 2020, no. 1(18), pp. 80–83.
- [22] Gabeev V.N., Gabeeva Z.P. *Kachestvo shishek i semyan sosny Banksa v dendrarii Severo-Osetinskogo universiteta v G. Vladikavkaze* [The quality of cones and seeds of Banks pine in the arboretum of the North Ossetian University in Vladikavkaz]. *Plodovodstvo, semenovodstvo, introduktsiya drevesnykh rasteniy* [Fruit growing, seed production, introduction of woody plants], 2009, v. XII, pp. 20–24.
- [23] Torchik V.I., Kondratov E.V. *Zhiznesposobnost' pyl'tsy spontannykh somaticheskikh mutatsiy pikhty koreyskoy (Abies koreana Wils.) i sosny Banksa (Pinus banksiana Lamb.)* [Viability of pollen of spontaneous somatic mutations of Korean fir (*Abies koreana Wils.*) and Banks pine (*Pinus banksiana Lamb.*)] *Izvestiya Natsional'noy akademii nauk Belarusi. Seriya biologicheskikh nauk* [News of the National Academy of Sciences of Belarus. Series of biological sciences], 2016, no. 2, pp. 22–26.
- [24] Putenikhin V.P., Sharipova M.Yu., Dubovik I.E., Khaziakhmetov R.M. *Lesovodstvennye osobennosti nekotorykh severoamerikanskikh sosen pri introduktsii v Bashkirskom Predural'e* [Forestry features of some North American pines during introduction in the Bashkir Urals]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Natural and technical sciences], 2019, no. 10(136), pp. 177–180.
- [25] Ostroshenko V.V., Ostroshenko L.Yu. *Vliyanie stimulyatorov na vskhozhest' semyan i rost seyantsev sosny Banksa (Pinus banksiana Lamb.)* [The effect of stimulants on seed germination and seedling growth of Banks pine (*Pinus banksiana Lamb.*)]. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University], no. 11, 2011, pp. 85–92.
- [26] Repin E.N., Popkov B.V. *Biologicheskie issledovaniya na Gornotaezhnoy stantsii* [Biological research at the mountain-taiga station]. *Vladivostok: Mountain-taiga Station of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences* [Mountain taiga station FEB RAS], 2004, no. 9, pp. 124–135.

- [27] Vadyunina A.F., Korchagina Z.A. *Metody issledovaniya fizicheskikh svoystv pochv* [Methods of investigation of physical properties of soils]. Moscow: Agropromizdat, 1986, 416 p.
- [28] Revyako I.I. *Lesnye kul'tury. Proektirovanie i sozdanie lesnykh nasazhdeniy* [Forest crops. Design and creation of forest plantations]. Novocherkassk State Medical Academy, 2013, 167 p.
- [29] de Groot W.J., Bothwell P.M., Taylor S.W., Wotton B.M., Stocks B.J., Alexander M.E. Jack pine regeneration and crown fires. *Canadian J. of Forest Research* 34 (8), 2004, pp. 1634–1641.
- [30] Yeatman C.W. The genetic basis of jack pine management. Jack Pine Symposium. Canadian Forest Service, Great Lakes Forest Research Centre, COFJRC Symposium Proceedings, 1984, pp. 1–12.
- [31] Lindsay R. Seed Matters 5: Lodgepole and Jack Pine Seed Treatments for Greenhouse Sowing. Alberta Agriculture and Forestry, Government of Alberta, 2020, pp. 1–9.
- [32] Cayford J.H., McRae D.J. The ecological role of fire in jack pine forests. *Role of Fire in Northern Circumpolar Ecosystems*. New York, NY: John Wiley and Sons, 322 p.
- [33] Mercier S., Morissette T., Blanchette D. Evaluation des cônes de pin gris en vue de la récolte de semences de qualité. Gouvernement du Québec, Ministère des Forêts, Direction de la recherche, 1991, pp. 1–42.
- [34] Ahlgren C.E. Some effects of prescribed burning on Jack Pine reproduction in northeastern Minnesota. University of Minnesota, Agricultural Experiment Station, Miscellaneous Report 94, Forestry Series 5, 1970, 16 p.
- [35] Harper J., Lovell E., Moore K. The shapes and sizes of seeds. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 1970, pp. 327–356.

Authors' information

Vasiliev Sergey Borisovich ✉ — Cand. Sc. (Agriculture), Head of the Department LT-1, BMSTU (Mytishchi branch), svasilyev@mgul.ac.ru

Lavrenov Maksim Aleksandrovich — Cand. Sc. (Agriculture), Associate Professor of the Department LT-1, BMSTU (Mytishchi branch), lavrenov@mgul.ac.ru

Kormilitsyna Ol'ga Vasil'evna — Cand. Sc. (Agriculture), Associate Professor of the Department LT-1, BMSTU (Mytishchi branch), ovkorm68@yandex.ru

Received 26.06.2023.

Approved after review 13.12.2023.

Accepted for publication 06.02.2024.

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

АРХИТЕКТУРНО-ЛАНДШАФТНАЯ СРЕДА ПЕШЕХОДНОЙ УЛИЦЫ КАК ФОРМА СУЩЕСТВОВАНИЯ ЛАНДШАФТА В УСЛОВИЯХ ГОРОДА(ОБЗОР)

В.В. Кругляк^{1✉}, Е.И. Гурьева², А.А. Горожанкина²

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

Приведена концептуальная модель исследования архитектурно-ландшафтной среды пешеходной улицы в условиях города. Представлена историческая ретроспектива развития ул. Карла Маркса в г. Воронеже и проанализированы особенности ее визуального восприятия. Рассмотрены схема улично-дорожной сети с выделением архитектурно-градостроительных сюжетов и схема озелененных территорий в пределах исследуемого квартала с указанием наиболее и самые распространенных типов посадок. Изложены современные концепции и подходы к преобразованию и использованию фактического ландшафта. Определен ассортимент растений, рекомендуемых для озеленения данной территории. Перечислены показатели качества ландшафтно-рекреационной территории на примере городской пешеходной улицы. Разработана схема функционального зонирования квартала с размещением площадок общего пользования различного назначения, рекомендуемая к практическому применению.

Ключевые слова: озеленение населенных пунктов, градостроительство, зеленые насаждения, пешеходная улица, архитектурно-ландшафтная среда

Ссылка для цитирования: Кругляк В.В., Гурьева Е.И., Горожанкина А.А. Архитектурно-ландшафтная среда пешеходной улицы как форма существования ландшафта в условиях города // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 2. С. 81–92. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-81-92

Исторический центр крупного города является одним из наиболее значимых объектов и для жителей, и для гостей [1]. Сочетание архитектуры, истории и определенной атмосферы вызывает повышенный интерес и привлекает внимание [2]. Для сохранения и развития таких уникальных территорий необходимо проведение ландшафтных реконструкций, особенно на пешеходных улицах [3].

Ландшафтная реконструкция пешеходной ул. Карла Маркса в г. Воронеже с полной заменой элементов внешнего благоустройства позволит решить задачи архитектурно-пространственного построения исторического центра города и создать композиционную ось, отвечающую современным требованиям зеленого строительства.

Цель работы

Цель работы — изучение принципов ландшафтной реконструкции пешеходной улицы города и разработка научно обоснованного подхода к подбору адаптивного ассортимента растений для озеленения рассматриваемого объекта общего пользования.

Объект исследования — частично пешеходная улица Карла Маркса, протяженностью 2,3 км,

которая расположена в историческом центре г. Воронежа. Исследуемый объект находится в жилом квартале, ограниченном улицами — Таранченко, Володарского, Кости Стрелюка, Орджоникидзе.

Предмет исследования — зеленые насаждения, визуальное восприятие объектов ландшафтной архитектуры и определяющие их факторы.

Материалы и методы

Для проведения научных исследований применен комплексный подход к изучению ландшафтно-градостроительных условий жилого квартала, в котором расположена рассматриваемая пешеходная улица [4]. Разработана модель исследования в виде индивидуальной схемы группирования определенных факторов [5]. Основными направлениями работ были анализ архитектурного и пространственного построения [6] и ландшафтная таксация зеленых насаждений [7]. В ходе выполнения исследований использовались методики, применяемые для формирования моделей — прототипов общественных пешеходных пространств [8], принципы организации предметно-пространственной среды пешеходных улиц [9], способы дизайна среды [10] и пространства пешеходных улиц крупных городов [11], применялись показатели комфортности крупнейших городов [12] и качества городской среды [13], учитывались

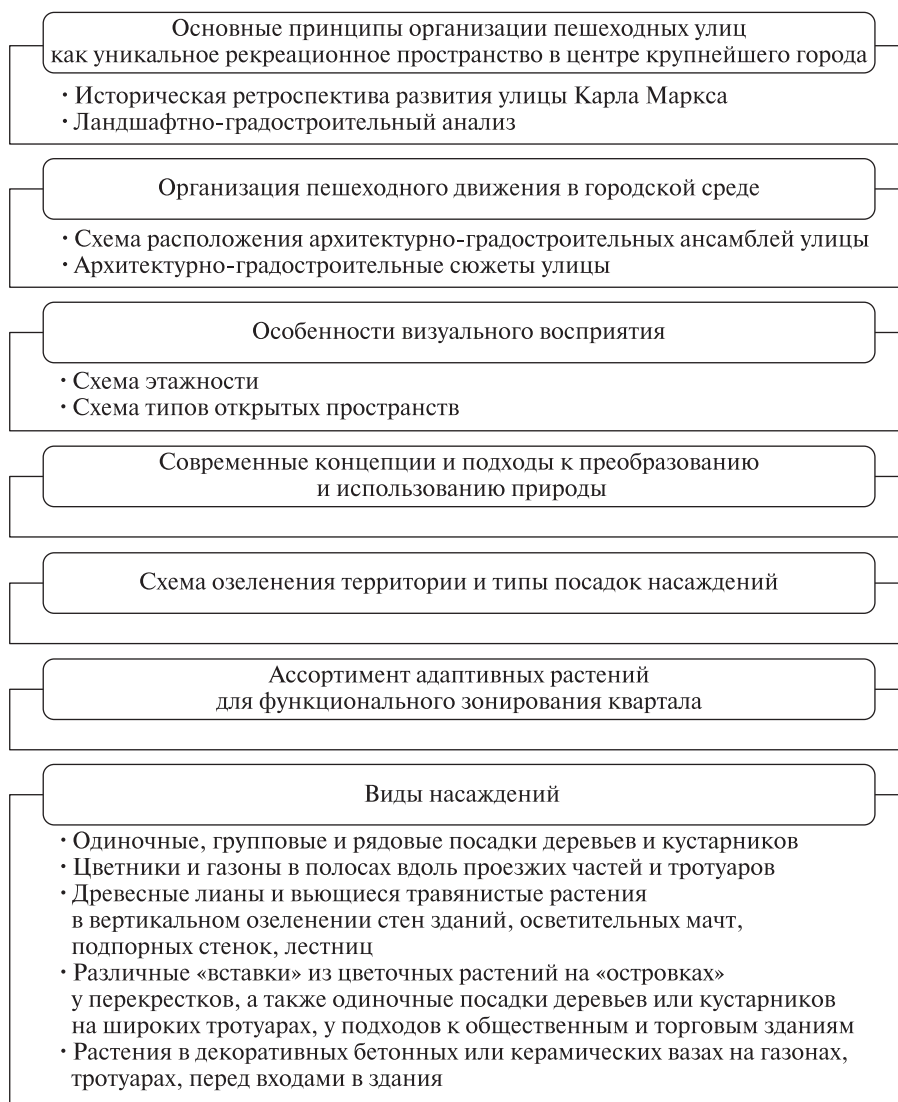


Рис. 1. Концептуальная модель исследования
Fig. 1. Conceptual model of the study

особенности транспортно-пешеходного пересечения городских улиц [14] и технические условия реконструкции городских зеленых насаждений [15]. Дендрологическое разнообразие растений составлено исходя из содержания Красной книги России [16], многообразия объектов ландшафтной архитектуры в городской среде [17], материалов генерального плана г. Воронежа [18], адаптивных систем озеленения в комплексном благоустройстве дворовых территорий [19], истории города в названиях улиц [20], методики неаллергенного озеленения урбанизированных территорий [21], принципов проектирования улиц [22], влияния загрязнений воздуха на растительность [23], эколого-лесоводственных основ зеленого строительства в крупных городах [24]. Адаптивный ассортимент растений подобран с учетом дендрологических районов России [25], комплексной организации предметно-простран-

ственной среды города [26], градостроительного и ландшафтно-визуального анализа объекта [27]. Учтены требования ГОСТ 25769–83 для саженцев деревьев хвойных пород, применяемых при озеленении городов [28]. Согласно ГОСТ 28329–89, использованы термины и определения, распространенные в сфере для озеленения городов [29], дендрозоологические и интродукционные свойства растений [30], исторический ассортимент растений [31].

Составлена концептуальная модель исследования архитектурно-ландшафтной среды пешеходной улицы как формы существования ландшафта в городских условиях (рис. 1).

Результаты и обсуждение

Основные принципы организации пешеходных улиц как уникальное рекреационное пространство в центре крупнейшего города.



1934 г. 2020 г.
Перекресток улицы Карла Маркса и проспекта Революции



1934 г. 2018 г.
Пожарная часть на пересечении улиц Таранченко и Карла Маркса



1960 г.



1873 г.



1914 г.



1965 г.



ул. Карла Маркса, 41



ул. Карла Маркса, 32



ул. Карла Маркса, 35



ул. Карла Маркса, 43

2000-е гг.

Рис. 2. Историческая ретроспектива развития улицы Карла Маркса
Fig. 2. Historical retrospective of Karl Marx Street development

В настоящее время внешнее благоустройство территории пешеходной ул. Карла Маркса в г. Воронеже физически и морально изношено. Во-первых, несовершенная организация пешеходного пространства создает определенные трудности для движения граждан. Узкие тротуары ограничивают пешеходов, вызывая дискомфорт, а в некоторых местах их отсутствие приводит к опасности и конфликтам с дорожным движением. Кроме того, отсутствуют специальные зоны отдыха и общественного пространства, что создает явный дефицит комфортных мест отдыха и социаль-

ной активности горожан. Во-вторых, состояние инфраструктуры также требует вмешательства. Такие устаревшие и плохо обустроенные элементы благоустройства, как скамейки, урны, объекты освещения и зонирования, создают впечатление запущенности и отсутствия ухода. Это не только делает визуальное восприятие негативным, но и отражается на общей безопасности и удобстве пользования городским пространством.

С учетом перечисленных проблем проведение ландшафтной реконструкции пешеходной улицы становится необходимостью.



Схема расположения архитектурно-градостроительных ансамблей города



• Архитектурно-градостроительный узел

Архитектурно-градостроительные сюжеты улицы



1. Две группы квартальных форм, имеющих разную планировочную морфологию



2. Непрерывность пешеходного движения



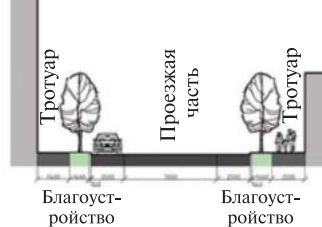
3. Композиция акцентов (доминантов) скрепляющих пространство и создающих запоминающийся образ места



4. Исторически подготовленная и планировочная геометрия — бульвар

- Границы территории исследования
- Улицы и дороги местного значения, направление движения
- Жилые здания
- Здания больниц
- Здания образовательных учреждений
- Территория общего пользования
- Территория ограниченного доступа
- Основные пешеходные направления
- Пешеходные переходы

Профиль 1-1 ул. Карла Маркса
М 1:200



Фоновый элемент



Жилой комплекс «Солнечный Олимп» по адресу: г. Воронеж, ул. Карла Маркса, 67

Доминанта



Воронежская государственная академия спорта

Акцент



Памятник И.С. Никитину

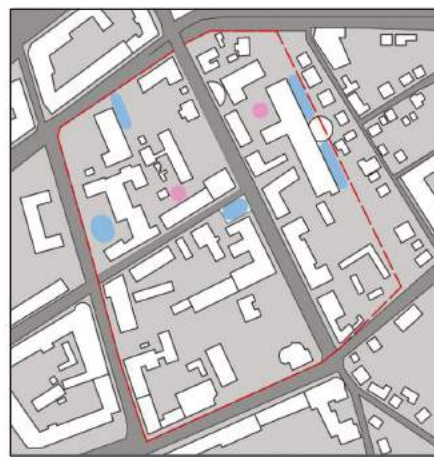
Рис. 3. Схема улично-дорожной сети с выделением архитектурно-градостроительных сюжетов

Fig. 3. The scheme of the road network with the allocation of architectural and urban plots



- Зона застройки малоэтажными многоквартирными жилыми домами
- Зона застройки среднеэтажными жилыми домами
- Зона застройки многоэтажными жилыми домами
- Хозяйственные постройки (сарай, гараж)

Схема этажности застройки



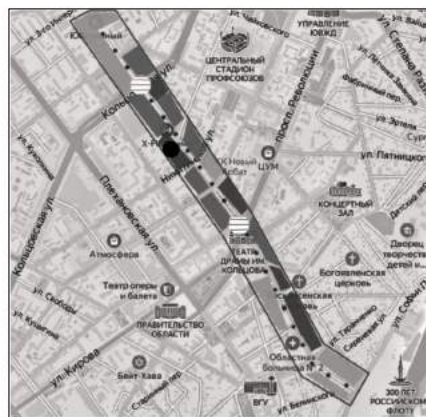
- Зона парковки
- Зона детских площадок

Схема функционального зонирования квартала (размещение площадок общего пользования различного назначения)

Смысловая нагрузка и негласная «команда» пространства (по Б. Кочневу)



Схема визуально-ландшафтного анализа



- Существующая застройка высокой этажности
- Существующая застройка средней этажности
- Существующая застройка низкой этажности
- Существующие зеленые массивы
- ≡ Пространственные узлы
- ... Пространственные оси
- Пространственная граница
- Архитектурные акценты

Схема типов открытых пространств

- 1 — обращенные пространства ограниченные объемными элементами с двух сторон
- 2 — обращенные пространства ограниченные объемными элементами с трех сторон
- 3 — раскрытое пространство

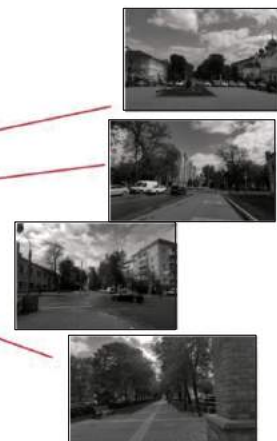
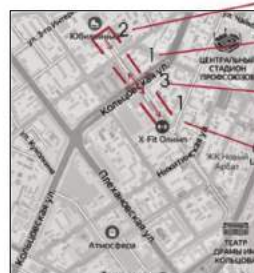


Рис. 4. Особенности зрительного восприятия улицы Карла Маркса
Fig. 4. Features of visual perception of Karl Marx Street

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ

- Сохранение основной транзитно-прогулочной функции
- Организация пересечений с проезжей частью с приоритетом пешеходного движения
- Сохранение зеленого фонда
- Создание инфраструктуры для существующих на территории городских сообществ
- Создание коммуникативных зон для различных возрастных групп
- Отражение ценностей места
- Воссоздание исторических фасадов в дополненной реальности
- Единый дизайн вывесок, оформление и архитектурная подсветка фасадов



Зеленая программа



Схема генерального плана (Фрагмент 1)

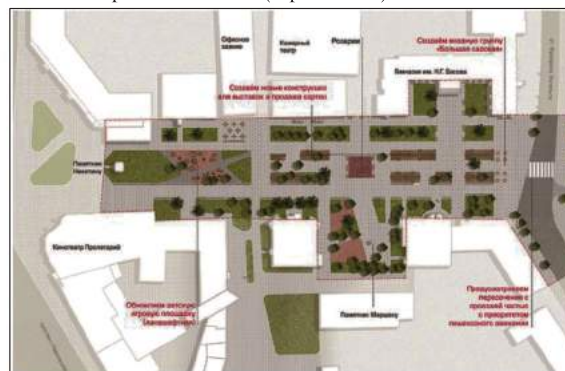


Рис. 5. Современные концепции и подходы к преобразованию и использованию природы (фото пресс-службы администрации Воронежа)

Fig. 5. Modern concepts and approaches to the transformation and use of nature Photo: Voronezh Administration Press Service

Организацию пространства пешеходной улицы следует пересмотреть в целях обеспечения реального комфорта и безопасности горожан, сохранения исторической атмосферы (рис. 2) и увеличения функциональности улицы. Для этого следует решить важные задачи, в частности расширение тротуаров, создание зон отдыха и общественного пространства, обновление инфраструктуры и организация зеленых насаждений.

Организация пешеходного движения в городской среде. При организации пешеходного движения в городской среде следует учитывать восприятие человеком зеленой зоны улицы и раскрытие ее архитектурно-градостроительных сюжетов (рис. 3). Условно можно выделить три уровня восприятия:

1) панорамное — восприятие человеком картины города с приобъектной точки или оси рядом с озелененной территорией, состоит из общего вида оптимального и эстетически успешного совмещения зеленой территории и жилых зон, предприятий и т. п.;

2) объемно-пространственное — восприятие человеком зеленых массивов путем создания или уменьшения визуального объема ландшафтных объектов как природного озеленения, так и урбанистических, состоит из формы и размера (площади) объекта, влияет путем визуального вытеснения окружающих ландшафтных объектов в результате акцентирования внимания на себя;

3) локальное — восприятие психологическое и физическое, проявляется в ощущении своего местонахождения рядом с зеленой зоной, состоит из плотности распределения озелененных зон по городу и удобства их расположения (рис. 4).

В настоящее время по всему миру иницируются городские проекты и разрабатываются концепции, направленные на преобразование и использование ландшафта в городской среде. На рис. 5 представлен проект-концепция ландшафтной реконструкции пешеходной ул. Карла Маркса г. Воронежа, инициаторами которого является администрация города.



Показатели качества ландшафтно-рекреационной территории на примере пешеходной улицы



Рис. 6. Схема озелененных территорий исследуемого квартала и основные распространенные типы посадок насаждений

Fig. 6. The scheme of the green areas of the studied city block and the most common types of plantings in the city block

Современные концепции и подходы к использованию ландшафта не только создают приятную атмосферу и улучшают экологическую обстановку, но и способствуют активному отдыху и здоровому образу жизни горожан.

Оздоровление городской среды и улучшение показателей качества ландшафтно-рекреационной территории на примере пешеходной улицы. Как показано выше, зеленая инфраструктура имеет важное значение в жизни городов, не только

**Адаптивный ассортимент растений,
рекомендуемых для озеленения
территории пешеходной
улицы Карла Маркса в г. Воронеже**
Adaptive assortment of plants recommended
for landscaping the territory of the pedestrian
Karl Marx street in Voronezh city

| Вид | Площадь озеленения, м ² | Количество растений, шт. | Вид посадки |
|--------------------------------|------------------------------------|--------------------------|--------------------|
| Деревья | | | |
| Береза пушистая | 120 | 20 | Аллея |
| Вишня сливолистная | 20 | 5 | Солитер |
| Дуб красный | 40 | 2 | То же |
| Ель канадская | 9 | 3 | «—» |
| Ель колючая | 21 | 3 | Ландшафтная группа |
| Ива вавилонская | 20 | 5 | То же |
| Катальпа бигнониевидная | 100 | 20 | Рядовая посадка |
| Каштан конский | 100 | 5 | Солитер |
| Клен остролистный (шаровидный) | 21 | 7 | Ландшафтная группа |
| Клен серебристый | 24 | 2 | Солитер |
| Липа мелколистная | 400 | 20 | Рядовая посадка |
| Магнолия Кобус | 10 | 5 | Солитер |
| Платан кленолистный | 300 | 20 | Рядовая посадка |
| Рябина обыкновенная | 42 | 7 | Ландшафтная группа |
| Яблоня Рудольф | 30 | 5 | Солитер |
| Всего | | 129 | |
| Кустарники | | | |
| Барбарис обыкновенный | 100 | 50 | Ландшафтная группа |
| Вейгела цветущая | 60 | 30 | То же |
| Гортензия метельчатая | 40 | 20 | «—» |
| Калина Бульденеж | 30 | 10 | «—» |
| Кизильник блестящий | 320 | 320 | Живая изгородь |
| Сирень обыкновенная | 60 | 15 | Ландшафтная группа |
| Спирея японская | 400 | 400 | То же |
| Роза сортовая (разновидности) | 250 | 250 | Цветник |
| Всего | | 1095 | |
| Цветы | | | |
| Лаванда узколистная | 80 | 400 | Цветник |
| Всего | | 2597 | 1624 |

придавая им красоту и привлекательность, но и содействуя благополучию и здоровью жителей (рис. 6). Эту концепцию должны понимать горожане и активно участвовать в создании зеленых зон и уходе за ними.

Одной из ключевых задач в деле озеленения городской среды является привлечение внимания общества к данной проблеме. В этих целях необходимо организовывать акции, мероприятия и программы, посвященные озеленению, которые смогут заинтересовать и привлечь горожан.

Полученные нами результаты инвентаризации зеленых насаждений подтвердили, что жизнестойчивость имеющихся насаждений на пешеходной улице в хорошем состоянии, за исключением нескольких берез, катальп, каштанов и тополей, которые подлежат вырубке.

Рекомендуемый адаптивный ассортимент растений. При выборе растений важно учитывать не только их приспособленность к городским условиям, но и эстетический фактор, место размещения в функциональной зоне (например, детских площадках следует высаживать растения без колючек, неядовитые, на спортивных площадках — «несорящие») (таблица).

Местные растения можно использовать как при создании новых объектов ландшафтного дизайна на пешеходной улице, так и при перепланировке уже существующих территорий с имеющимися зелеными зонами. Это позволяет создавать единый стиль и обеспечивает гармоничное сочетание растительности с окружающей природной средой.

Характер размещения зеленых насаждений на пешеходной улице зависит, кроме того, от местных климатических особенностей. В южных городах, например, деревья становятся естественными теньевыми навесами, под которыми обычно размещают скамьи. В иных условиях решающую роль может играть необходимость аэрации (минимум плотных посадок, широкие разрывы, открытые газоны) или, наоборот, ветрозащиты (плотные древесно-кустарниковые полосы-укрытия).

Еще один подход к созданию искусственного ландшафта в городской среде — вертикальное озеленение. Вертикальные сады и стены из растений, установленные на фасадах зданий, способны превратить серые городские стены в зеленые оазисы. Это помогает как визуально украсить городскую среду, так и улучшить экологическую обстановку, увеличивая количество кислорода в воздухе и поглощая вредные вещества.

Выводы

1. Ландшафтная организация территории пешеходной улицы Карла Маркса является уникальным архитектурно-ландшафтным пространством

в историческом центре г. Воронежа, поскольку отражает исторические ценности места и демонстрирует формы существования искусственного ландшафта в городской среде. При ландшафтной реконструкции следует сохранить основную транзитно-прогулочную функцию и добавить такие новые функции, как познавательная, торговая, культурно-просветительская и рекреационная, ориентированные на все группы населения.

2. Подходы к преобразованию и использованию искусственного ландшафта в городской среде г. Воронежа продолжают развиваться для улучшения экологической ситуации и поддержания баланса между городской жизнью и возможностями природы. Результат ландшафтной реконструкции пешеходной улицы Карла Маркса — это удобно расположенные зеленые зоны в историческом центре крупного города, оснащенные инфраструктурой, являющиеся важным местом отдыха, спорта и активного времяпрепровождения жителей города, что позитивно скажется на социальной жизни жителей города и гостей.

3. Алгоритм стратегии плана озеленения г. Воронежа должен включать в себя осведомление горожан о важности зеленой инфраструктуры, активное вовлечение и поддержку общественности, а также постоянное информирование о проделанной работе и будущих планах. Только совместными усилиями горожан, желающих улучшить свой город мы сможем достичь заметных результатов и создать комфортную и благоприятную среду для жизни.


4. Историческая застройка центра г. Воронежа имеет эстетический вид зданий, а при расширении показателей качества ландшафтно-рекреационной территории и дополнении ассортимента рекомендуемых адаптивных растений пешеходная улица станет эталоном взаимодействия человека с архитектурно-ландшафтной средой в крупном городе.

Список литературы

- [1] Шутка А.В., Гурьева Е.И. Современные тенденции формирования арт-объектов в городской среде (на примере жилого комплекса «Виадук» в г. Воронеже) // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета, 2022. Т. 24. № 4. С. 9–19.
- [2] Гурьева Е.И., Воробьев В.А. Современные тенденции развития общественных спортивных зон в локальной градостроительной среде // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета, 2022. Т. 24. № 5. С. 48–61.
- [3] Биоразнообразие города Воронежа / под ред. О.П. Негрובה. Воронеж: Изд-во Воронежского государственного университета, 2004. 98 с.
- [4] Методика системных исследований лесоаграрных ландшафтов. М.: Изд-во ВАСХНИЛ, 1985. 112 с.
- [5] Урбах А.И., Лин М.Т. Архитектура городских пешеходных пространств. М.: Стройиздат, 1990. 200 с.
- [6] Крашенинников А.В. Градостроительное развитие жилой застройки: исследование опыта западных стран. М.: Архитектура-С, 2005. 112 с.
- [7] Закирова Ю.А. Создание комфортной пешеходной системы в центре современного крупного города // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета, 2007. № 2 (8). С. 15–17.
- [8] Закирова Ю.А. Формирование моделей-прототипов общественных пешеходных пространств // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета, 2012. № 3 (21). С. 27–31.
- [9] Михайлов С.М., Белов М.И. Принципы организации предметно-пространственной среды пешеходных улиц (1960–1980-е гг.) // Мир науки, культуры, образования, 2010. № 6–2 (25). С. 80–83.
- [10] Месенева Н.В. К вопросу организации дизайн-среды пешеходных улиц центра города // Современные наукоемкие технологии, 2017. № 7. С. 38–42.
- [11] Белов М.И., Михайлов С.М., Михайлова А.С. Дизайн пешеходной улицы / под ред. С.М. Михайлова. Казань: Дизайн-квартал, 2015. 188 с.
- [12] 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.
- [13] Герцберг Л.Я. Качество городской среды: проблемы проектирования и реализации // Теория градостроительства, 2013. № 2 (24). С. 29–33.
- [14] Бураков Р.А., Овчинников И.Г. Разработка и анализ вариантов проекта транспортно-пешеходного пересечения городских улиц в крупном городе // Вестник евразийской науки, 2021. Т. 13. № 2. С. 5.
- [15] Методическое руководство и технические условия по реконструкции городских зеленых насаждений. М.: МГУЛ, 2001. 60 с.
- [16] Растения Красной книги России в коллекциях ботанических садов и дендрариев. М.: Изд-во ГБС РАН; Тула: Гриф и К, 2005. 144 с.
- [17] Теодоронский В.С., Боговая И.О. Объекты ландшафтной архитектуры. М.: МГУЛ, 2001. 330 с.
- [18] Материалы по обоснованию изменений в генеральный план городского округа город Воронеж. 15837-ПЗ. Воронеж: ВПИ, 2014. 64 с.
- [19] Кругляк В.В., Гурьева Е.И. Адаптивные системы озеленения в комплексном благоустройстве дворовых территорий Центрального Черноземья. Воронеж: Научная книга, 2012. 118 с.
- [20] Попов П.А. Воронеж: История города в названиях улиц. 2-е изд. Воронеж: Кварта, 2003. 448 с.
- [21] Иванова Н.В., Дубов И.А., Назаров К.Р., Мурадов И.С. Проектирование неаллергенного озеленения урбанизированных территорий // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура, 2021. № 4 (85). С. 230–242.
- [22] Иванова Н.В. Принципы проектирования озеленения и дизайна улиц (на примере Волгограда): автореф. дис. ... канд. архитектуры. Санкт-Петербургский архитектурно-строительный ун-т. Санкт-Петербург, 1995. 30 с.
- [23] Влияние загрязнений воздуха на растительность / под ред. Х.Г. Десслера. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 184 с.
- [24] Кочарян К.С. Эколого-лесоводственные основы зеленого строительства в крупных городах Центральной части России (на примере г. Москвы): автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Московская сельскохозяйственная академия имени К. А. Тимирязева. Москва, 1999. 48 с.

- [25] Кругляк В.В., Гурьева Е.И. Древодводство. Воронеж: Изд-во ВГЛТА, 2011. 144 с.
- [26] Михайлов С.М. Дизайн современного города комплексная организация предметно-пространственной среды (теоретико-методологическая концепция): автореф. дис. ... д-ра искусствоведения. Москва, 2011. 57 с.
- [27] Михалчева С.Г. Градостроительный и ландшафтно-визуальный анализ. Пенза: Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2016. 120 с.
- [28] ГОСТ 25769–83. Саженцы деревьев хвойных пород для озеленения городов. Технические условия от 23 июня 2009 г. М.: Росстандарт, 2009. 10 с.
- [29] ГОСТ 28329–89. Озеленение городов. Термины и определения. М.: Издательство стандартов, 1990. 13 с.
- [30] Машкин С.И. Дендрология Центрального Черноземья. Систематика, кариология, география, генезис, экология и использование местных и интродуцированных деревьев и кустарников. Воронеж: Изд-во Воронежского государственного университета, 1971. 344 с.
- [31] Успенский Ю.И. Старый Воронеж. Художественно-исторический очерк. Воронеж: Профтехшкола, 1921. 80 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

Горожанкина Анастасия Алексеевна — бакалавр градостроительства факультета архитектуры и градостроительства, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», zoo4@mail.ru

Поступила в редакцию 12.08.2023.

Одобрено после рецензирования 12.12.2023.

Принята к публикации 06.02.2024.

ARCHITECTURAL AND LANDSCAPE ENVIRONMENT OF PEDESTRIAN STREET AS FORM OF LANDSCAPE EXISTENCE IN URBAN ENVIRONMENT

V.V. Kruglyak¹ , E.I. Gur'eva², A.A. Gorozhankina²

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 for studying the architectural and landscape environment of a pedestrian street in an urban environment is presented. A historical retrospective of Karl Marx street development in the metropolis of Voronezh is presented. The scheme of the street and road network is considered, highlighting architectural and urban planning subjects. The features of visual perception of Karl Marx street are analyzed. Modern concepts and approaches to the transformation and use of the actual landscape are presented. A diagram of the green areas of the studied city block and the most common types of plantings in the city block have been established. An assortment of plants recommended for landscaping the territory of the pedestrian Karl Marx Street in Voronezh has been determined. Indicators of the quality of landscape and recreational territory are indicated using the example of a pedestrian street. A functional zoning scheme for the block with the placement of public areas for various purposes is recommended.

Keywords: landscaping of settlements, urban planning, green spaces, pedestrian street, architectural and landscape environment

Suggested citation: Kruglyak V.V., Gur'eva E.I., Gorozhankina A.A. *Arkhitekurno-landshaftnaya sreda peshkhnodnoy ulitsy kak forma sushchestvovaniya landshafta v usloviyakh goroda* [Architectural and landscape environment of pedestrian street as form of landscape existence in urban environment]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 2, pp. 81–92. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-81-92

References

- [1] Shutka A.V., Gur'eva E.I. *Sovremennye tendentsii formirovaniya art-ob'ektov v gorodskoy srede (na primere zhilogo kompleksa «Viaduk» v g. Voronezhe)* [Modern trends in the formation of art objects in the urban environment (using the example of the Viaduct residential complex in Voronezh)]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekurno-stroitel'nogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering], 2022, v. 24, no. 4, pp. 9–19.

- [2] Gur'eva E.I., Vorob'ev V.A. *Sovremennye tendentsii razvitiya obshchestvennykh sportivnykh zon v lokal'noy gradostroitel'noy srede* [Modern trends in the development of public sports zones in the local urban planning environment]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta [Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering], 2022, t. 24, no. 5, pp. 48–61.
- [3] *Bioraznoobrazie goroda Voronezha* [Biodiversity of the city of Voronezh]. Ed. O.P. Negrobova. Voronezh: Voronezh State University Publishing House, 2004, 98 p.
- [4] *Metodika sistemnykh issledovaniy lesoagrarnykh landshaftov* [Methodology for systematic research of forest-agrarian landscapes]. Moscow: Publishing house VASKHNIL, 1985, 112 p.
- [5] Urbakh A.I., Lin M.T. *Arkhitektura gorodskikh peshekhodnykh prostranstv* [Architecture of urban pedestrian spaces]. Moscow: Stroyizdat, 1990, 200 p.
- [6] Krashennnikov A.V. *Gradostroitel'noe razvitie zhilykh zastroyki: issledovanie opyta zapadnykh stran* [Urban development of residential buildings: a study of the experience of Western countries]. Moscow: Architecture-S, 2005, 112 p.
- [7] Zakirova Yu.A. *Sozdanie komfortnoy peshekhodnoy sistemy v tsentre sovremennogo krupnogo goroda* [Creation of a comfortable pedestrian system in the center of a modern large city]. Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta [News of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering], 2007, no. 2 (8), pp. 15–17.
- [8] Zakirova Yu.A. *Formirovanie modeley-prototipov obshchestvennykh peshekhodnykh prostranstv* [Formation of prototype models of public pedestrian spaces]. Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta [News of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering], 2012, no. 3 (21), pp. 27–31.
- [9] Mikhaylov S.M., Belov M.I. *Printsipy organizatsii predmetno-prostranstvennoy sredy peshekhodnykh ulits (1960–1980-e gg.)* [Principles of organizing the subject-spatial environment of pedestrian streets (1960–1980)]. [World of Science, Culture, Education], 2010, no. 6–2 (25), pp. 80–83.
- [10] Meseneva N.V. *K voprosu organizatsii dizayn-sredy peshekhodnykh ulits tsentra goroda* [On the issue of organizing the design environment of pedestrian streets in the city center]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern science-intensive technologies], 2017, no. 7, pp. 38–42.
- [11] Belov M.I., Mikhaylov S.M., Mikhaylova A.S. *Dizayn peshekhodnoy ulitsy* [Design of a pedestrian street]. Ed. CM. Mikhailov. Kazan: Design Quarter, 2015, 188 p.
- [12] Prokopenko V.V., Ganzha O.A. *K voprosu o metodakh otsenki pokazatelya komfortnosti landshaftno-rekreatsionnykh territoriy krupneyshikh gorodov (na primere goroda Volgograda)* [On the question of methods for assessing the comfort indicator of landscape and recreational territories of the largest cities (using 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, vol. 40 (59), pp. 73–88.
- [13] Gertsberg L.Ya. *Kachestvo gorodskoy sredy: problemy proektirovaniya i realizatsii* [Quality of the urban environment: problems of design and implementation]. *Teoriya gradostroitel'stva* [Urban Planning Theory], 2013, no. 2 (24), pp. 29–33.
- [14] Burakov R.A., Ovchinnikov I.G. *Razrabotka i analiz variantov proekta transportno-peshekhodnogo peresecheniya gorodskikh ulits v krupnom gorode* [Development and analysis of project options for transport and pedestrian intersection of city streets in a large city]. Vestnik evraziyskoy nauki [Bulletin of Eurasian Science], 2021, v. 13, no. 2, p. 5.
- [15] *Metodicheskoe rukovodstvo i tekhnicheskie usloviya po rekonstruktsii gorodskikh zelenykh nasazhdeniy* [Methodological guidelines and technical conditions for the reconstruction of urban green spaces]. Moscow: MGUL, 2001, 60 p.
- [16] *Rasteniya Krasnoy knigi Rossii v kollektivyakh botanicheskikh sadov i dendrariyev* [Plants of the Red Book of Russia in the collections of botanical gardens and arboretums]. Moscow: Publishing house GBS RAS; Tula: Grif i K, 2005, 144 p.
- [17] Teodoronskiy V.S., Bogovaya I.O. *Ob'ekty landshaftnoy arkhitektury* [Landscape architecture objects]. Moscow: MGUL, 2001, 330 p.
- [18] *Materialy po obosnovaniyu izmeneniy v general'nyy plan gorodskogo okruga gorod Voronezh* [Materials to justify changes to the master plan of the Voronezh urban district. 15837-PZ]. Voronezh: VPI, 2014, 64 p.
- [19] Kruglyak V.V., Gur'eva E.I. *Adaptivnye sistemy ozeleneniya v kompleksnom blagoustroystve dvorovykh territoriy Tsentral'nogo Chernozem'ya* [Adaptive landscaping systems in the complex improvement of courtyard areas in the Central Black Earth Region]. Voronezh: Scientific book, 2012, 118 p.
- [20] Popov P.A. *Voronezh: Istoriya goroda v nazvaniyakh ulits* [Voronezh: History of the city in street names]. Voronezh: Kvarta, 2003, 448 p.
- [21] Ivanova N.V., Dubov I.A., Nazarov K.R., Muradov I.S. *Proektirovanie neallergennogo ozeleneniya urbanizirovannykh territoriy* [Design of non-allergenic landscaping in urban areas]. 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.
- [22] Ivanova N.V. *Printsipy proektirovaniya ozeleneniya i dizayna ulits (na primere Volgograda)* [Principles of landscaping and street design (using the example of Volgograd)]. Abstract of thesis. Dis. Cand. Sci. Architecture. St. Petersburg University of Architecture and Civil Engineering. St. Petersburg, 1995, 30 p.
- [23] *Vliyanie zagryazneniy vozdukh na rastitel'nost'* [The influence of air pollution on vegetation]. Ed. H.G. Dessler. Moscow: Lesnaya prom-st [Timber industry], 1981, 184 p.
- [24] Kocharyan K.S. *Ekologo-lesovodstvennye osnovy zelenogo stroitel'stva v krupnykh gorodakh Tsentral'noy chasti Rossii (na primere g. Moskvy)* [Ecological and forestry foundations of green construction in large cities of Central Russia (using the example of Moscow): abstract of thesis]. Dis. Dr. Sci. (Agric.). Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev. Moscow, 1999, 48 p.
- [25] Kruglyak V.V., Gur'eva E.I. *Drevovodstvo* [Arboriculture]. Voronezh: VGLTA Publishing House, 2011, 144 p.
- [26] Mikhaylov S.M. *Dizayn sovremennogo goroda kompleksnaya organizatsiya predmetno-prostranstvennoy sredy (teoretiko-metodologicheskaya kontseptsiya)* [Design of a modern city, complex organization of the subject-spatial environment (theoretical and methodological concept)]. Abstract of thesis Dis. Dr. of Art History. Moscow, 2011, 57 p.

- [27] Mikhhalcheva S.G. *Gradostroitel'nyy i landshaftno-vizual'nyy analiz* [Urban planning and landscape-visual analysis]. Penza: Penzenskiy gosudarstvennyy universitet arkhitektury i stroitel'stva [Penza State University of Architecture and Construction], 2016, 120 p.
- [28] GOST 25769–83 *Sazhentsy derev'ev khvoynykh porod dlya ozeleneniya gorodov* [Coniferous tree seedlings for urban landscaping]. Technical specifications dated June 23, 2009. Moscow: Rosstandart, 2009, 10 p.
- [29] GOST 28329–89 *Ozelenenie gorodov. Terminy i opredeleniya* [Greening cities. Terms and Definitions]. Moscow: Standards Publishing House, 1990, 13 p.
- [30] Mashkin S.I. *Dendrologiya Tsentral'nogo Chernozem'ya. Sistematika, kariologiya, geografiya, genezis, ekologiya i ispol'zovanie mestnykh i introdutsirovannykh derev'ev i kustarnikov* [Dendrology of the Central Black Earth Region. Systematics, karyology, geography, genesis, ecology and use of native and introduced trees and shrubs]. Voronezh: Voronezh State University Publishing House, 1971, 344 p.
- [31] Uspenskiy Yu.I. *Staryy Voronezh. Khudozhestvenno istoricheskiy ocherk* [Old Voronezh. Artistic historical essay]. Voronezh: Proftekhshkola [Vocational School], 1921, 80 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

Gorozhankina Anastasia Alekseevna — student of the Voronezh State Technical University, zoo4@mail.ru

Received 12.08.2023.

Approved after review 12.12.2023.

Accepted for publication 06.02.2024.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

The authors declare that there is no conflict of interest

ОСОБЕННОСТИ ВНЕШНЕГО БЛАГОУСТРОЙСТВА ТЕРРИТОРИИ ДЕТСКОЙ ГОРОДСКОЙ КЛИНИЧЕСКОЙ БОЛЬНИЦЫ № 13 ИМЕНИ Н.Ф. ФИЛАТОВА (МОСКВА)

В.С. Теодоронский

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1
vst01@mail.ru

Приведены предложения и практические рекомендации по благоустройству территории ГБУЗ г. Москвы «Детская городская клиническая больница № 13 имени Н.Ф. Филатова». Указана необходимость проведения мероприятий по созданию благоприятных и комфортных санитарно-гигиенических условий пребывания пациентов, по организации и благоустройству центра медицинской реабилитации с открытыми площадками активного отдыха и сенсорным оборудованием, по внедрению эстетически выразительных малых архитектурных форм, а также созданию зеленых насаждений ценных декоративных свойств. Рассмотрены организация безбарьерного транспортного движения с помощью различных средств, в частности ограничителей и подходов к лечебным корпусам, и применение типов мощения из прочных декоративных материалов.

Ключевые слова: благоустройство, безбарьерное движение, выделение зон отдыха и реабилитации, эстетическая выразительность, безопасность

Ссылка для цитирования: Теодоронский В.С. Особенности внешнего благоустройства территории Детской городской клинической больницы № 13 имени Н.Ф. Филатова (Москва) // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 2. С. 93–104. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-93-104

При организации работ по благоустройству территорий детских больниц большое значение имеют наличие и удобство дорожно-транспортной сети, подходы к больничным и хозяйственным корпусам, площадкам отдыха. Площадь благоустроенной территории больницы, как правило, должна включать в себя газоны, цветники, дорожки и площадки для отдыха и по современным нормативам составлять не менее 50 % общей площади участка больницы [2, 15]. При разработке мероприятий по организации благоустройства больничных территорий необходимо учитывать требования к освещенности и аэрации, созданию устойчивых зеленых насаждений, удобству проезда медицинского транспорта — от въезда на территорию до приемного покоя, к служебно-хозяйственным службам, автостоянкам, подходам по дорожкам к площадкам отдыха. На территории рядом с лечебными корпусами можно организовать *специализированные больничные сады* [15, 16], разделенные ограждениями, которые представляли бы собой единые ландшафтно-архитектурные комплексы, с площадками и лужайками, окруженными кулисами древесных насаждений и сформированные по типу открытых и полуоткрытых пространств, что способствовало бы повышению климатотерапевтических качеств территории для оптимизации лечебных процедур.

Растения и различные их сочетания могут оказывать различное влияние на эмоциональное и психическое состояние людей, в частности форма крон, ствола, окраска листвы и др. [15].

Одним из примеров благоустройства больничных территорий может служить Детская городская клиническая больница № 13 имени Н.Ф. Филатова (ДГКБ № 13 им. Н.Ф. Филатова). Рекомендации по комплексному благоустройству территории выполнялись здесь по заказу префектуры Центрального административного округа совместно с Департаментом здравоохранения Москвы и при участии проектного бюро ПМ1 (ландшафтный архитектор Н.А. Соловьева) [1–3].

Характерной особенностью ДГКБ № 13 им. Н.Ф. Филатова является наличие на ее территории исторических объектов федерального и регионального назначения, датируемые XIX — началом XX вв. [1, 2]:

1) дом Протковой — возведен в 1809 г. для Марфы Протковой, супруги коллежского асессора, как усадебный в стиле ампира (приписывается архитектору О.И. Бове), перестроен в 1841 г. В настоящее время здание служит административным корпусом;

2) дом Небольсиных (дом Гагарина) — построен во второй половине XVIII в., перестроен в стиле ампира (по проекту О.И. Бове), в настоящее время является объектом культурного наследия федерального значения [2, 16];



Рис. 1. Памятник Н.Ф. Филатову (скульптор Д.П. Шварц, архитектор Ю.Я. Сосенко; <http://intomoscow.ru>)
Fig. 1. Monument to N.F. Filatov (sculptor D.P. Shvarts, architect Y.Y. Sosenko; <http://intomoscow.ru>)

- 3) ограда больницы с главным въездом, выполненная по проекту Каминского (1897);
- 4) больничный сад (объект государственной охраны садово-паркового искусства);
- 5) памятник Н.Ф. Филатову — объект монументального зодчества (рис. 1).

Цель работы

Цель работы — исследование территории больницы и выявление особенностей, недостатков во внешнем благоустройстве в связи с наличием ценных объектов культурно-исторического значения, в формировании насаждений — деревьев, кустарников, цветников, имеющих оздоравливающее и декоративное значение, в организации безопасного дорожного и пешеходного движения, в разработке рекомендаций по установке новых малых архитектурных форм.

Материалы и методы

Общими в работе ДГКБ № 13 им. Н.Ф. Филатова больницы определены следующие задачи:

- использование исторического наследия при решении задач внешнего благоустройства;
- обеспечение комфортного пребывания пациентов путем устройства специальных зон лечебно-

профилактического отдыха, установки малых архитектурных форм и безопасного садово-паркового оборудования;

- создание удобства передвижения (организация безбарьерной среды передвижения, удобство для посетителей с колясками);

- формирование экологичности среды путем оптимизации состава и структуры зеленых насаждений, использования экологически чистых качественных материалов, способствующих улучшению микроклиматических и эстетических характеристик [15].

В ходе работы использовались следующие аналитические методы: исторический анализ; визуальный анализ маршрутов на территории больницы; анализ основных функциональных особенностей территории с точки зрения наличия памятников культурного наследия; обзорный анализ пешеходного и транспортного движения, подходов, подъездов к зданиям и сооружениям; оценка состояния насаждений, конструктивных покрытий дорожной сети, малых архитектурных форм, садово-паркового оборудования [1, 2].

Краткий исторический анализ. Участок ДГКБ № 13 им. Н.Ф. Филатова исторически сложился во владении князя А.Я. Урусова в первой половине XVIII в. Главное здание — дом (вторая половина XVIII в.) после пожара 1812 г. принадлежал гражданскому губернатору Москвы Н.А. Небольсину. Вместе с боковыми флигелями, расположенными симметрично по сторонам дома, и обширным парком, окружавшим здания, ансамбль представлял собой богатую городскую усадьбу. С 1848 г. здание стало принадлежать Ростопчиным. В нем размещалась картинная галерея, в дальнейшем ставшая публичной.

В середине XIX в., состояние дел по оказанию медицинской помощи детскому населению г. Москвы было крайне неблагоприятным, фиксировалась высокая детская смертность, были широко распространены инфекционные заболевания. Московские врачи и общественность начали ходатайствовать об открытии детской клиники в Москве. С разрешения генерал-губернатора Москвы князя Д.В. Голицына был проведен сбор средств на устройство детской клиники на территории, приобретенной городом усадьбы А.Н. Неклюдовой (ул. Малая Бронная). 6 декабря 1842 г. была открыта первая детская больница в Москве. В 1845 г. детскую больницу причислили к учреждениям Императрицы Марии и к Московскому воспитательному дому.

С 1846 г. в больнице проходили практическое обучение студенты-медики Императорского Московского университета. Главными докторами детской клиники в разные годы становились выдающиеся представители медицинской науки,

которые помимо высоких клинических знаний обладали и ярко выраженной общественной позицией в деле организации и развития российской педиатрии: А.С. Кроненберг (1842–1862), Л.Г. Высокотский (1862–1870), Н.А. Тольский (1870–1874), Е.А. Покровский (1874–1894), Н.В. Яблоков (1897–1904), Д.Е. Горохов (1904–1921).

В 1885 г. князь А.А. Щербатов принес в дар городским властям для обустройства больницы поместье с парком на Садовой-Кудринской улице. Для расширения территории рядом с поместьем А.А. Щербатова городом было куплено поместье дворянки О.Н. Коншиной. 12 ноября 1887 г. больница приняла пациентов на новой территории, где располагается и в настоящее время.

Больница была рассчитана на 100 кроватей, оборудована в соответствии с требованиями (канализацией, электроснабжением, механической прачечной, прозекторской, моргом). По проекту архитектора А.С. Каминского (1829–1897) были построены амбулатория, трехэтажный корпус с просторными палатами, церковь.

С установлением советской власти характер деятельности Софийской больницы не изменился. В 1922 г. ей присвоено имя первого русского педиатра профессора Нила Федоровича Филатова, больницу стали называть Филатовской.

В конце 1920-х годов наиболее острой проблемой здравоохранения была очень высокая младенческая смертность (из 1000 рожденных умирало 270). Оказание медицинской помощи детям проводилось врачами общей практики, поэтому был поставлен вопрос об организации специального медицинского факультета по подготовке детских врачей.

В 1930 г. впервые в мировой практике, был создан факультет охраны материнства и детства, послуживший основой нынешнего педиатрического факультета.

На рис. 2 приводятся данные по застройке территории с корпусами историко-культурного назначения и современными корпусами по датам строительства, показаны исторические и современные фотографии территории больницы. Церковь святых мучениц Софии и Татианы расположена в Пресненском районе Центрального административного округа города Москвы (ул. Садовая-Кудринская, д. 15, стр. 9) — объект регионального культурного наследия, охраняется государством.

Анализ плана, приведенного на рис. 2, а показал, что здания имели разных владельцев и относились к различным периодам времени создания. Общая планировка территории в современных границах постоянно изменялась, застраивали ее стихийно, приспособлявая под текущие нужды медицинского учреждения. На сегодняшний день,

несмотря на наличие памятников культурно-исторического значения, стилистическое единство архитектурного ансамбля практически отсутствует.

Функциональный анализ территории.

В ходе работ было установлено, что нарушений функционально-планировочного характера территории в отношении главных и второстепенных композиционных планировочных осей конца XIX — первой половины XX вв. не обнаружено. Основными композиционными осями являются следующие:

1) главная подъездная дорога — аллея конца XIX в., ориентированная на церковь св. мучениц Софии и Татианы, проложенная от парадного въезда по межевой границе двух соседних усадеб;

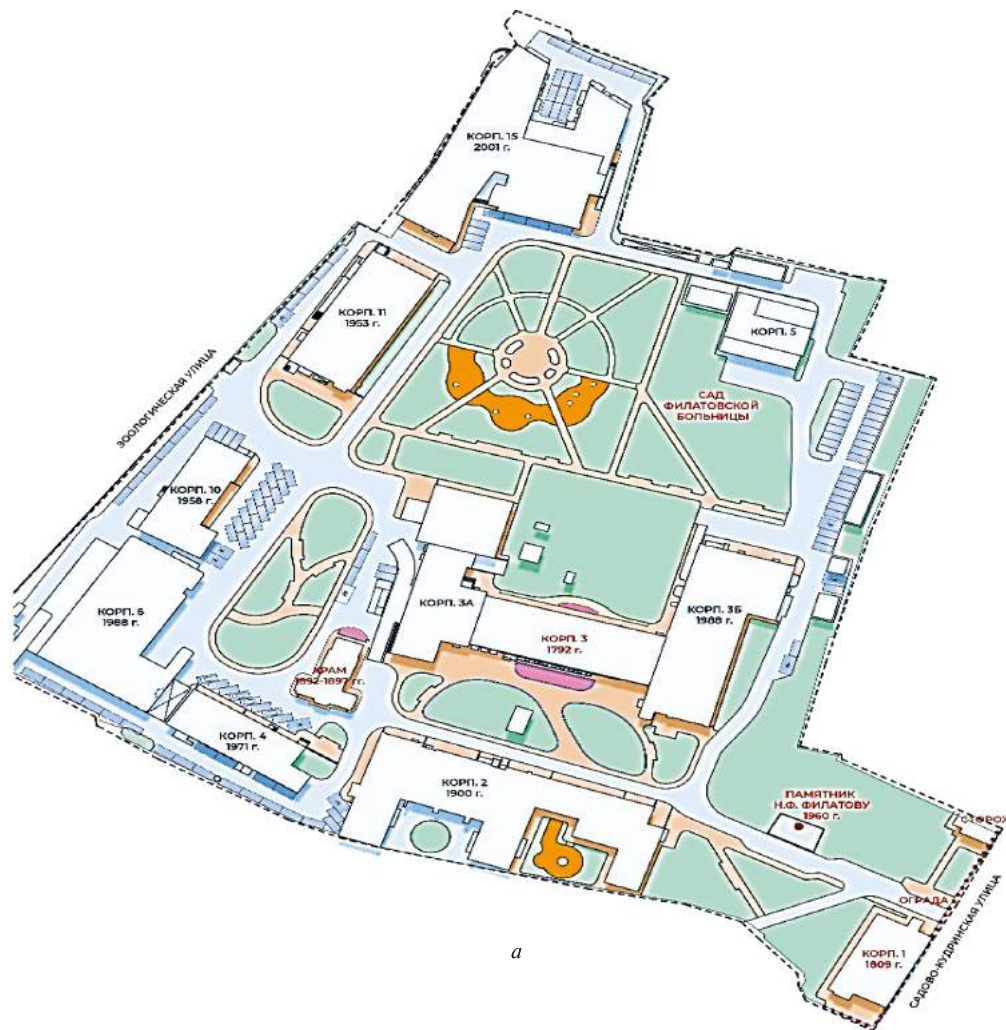
2) подъездная дорога к главному корпусу больницы (бывшая усадьба Небольсиных — дом Гагарина, корпус 3Б);

3) местоположение и ось главного входа и въезда конца XIX в. со стороны Садово-Кудринской улицы;

4) больничный сад.

Обследование территории сада показало, что со временем произошли изменения, исчез прямоугольный водоем, изменилась внутренняя конфигурация дорожек, уменьшилась территория. К середине XX в., начиная с послевоенного времени, приступили к воссозданию сада в классических композициях планировки с сохранением аллейных регулярных посадок из деревьев липы.

В результате проведенных исследований были выделены следующие *функциональные зоны*: транспортно-пешеходную или транзитную для экстренного проезда к приемным отделениям и остановки машин скорой помощи; кратковременного ожидания для сопровождающих (между приемными отделениями); длительного ожидания в теплое время года; хозяйственную (с хозблоками хранения отходов), парковочную различных категорий; спортивную для персонала больницы. Новым элементом стал центр медицинской реабилитации (корпус № 15) для проведения занятий по лечебной физкультуре (ЛФК). В непосредственной близости от этого корпуса в больничном саду рекомендовано оборудование детской площадки размером более 400 м², включающей в себя устройства для занятий ЛФК, которая должна быть представлена следующими элементами: 1) сенсорной дорожкой, площадкой; 2) лабиринтом для детей, шведской стенкой; 3) интерактивно-сенсорными панелями для занятий с детьми; 4) индивидуальной мультиспортивной формой для закрытого двора больничной территории. Внутренняя часть больничного сада оформлена аркадами, беседкой. Кроме того, рекомендуется проложить удобные тропинки для прогулок с колясками и места для отдыха со скамейками.



a



б



в



г



д



е

Рис. 2. План территории ДГКБ № 13 им. Н.Ф. Филатова (<https://filatovmos.ru/contacts/plan.html>): а — план застройки; б — корпус 1 (дом Протковой) 1809 г.; в — историческая ограда с воротами; г — амбулатория детской больницы (старый корпус) 1900 г.; д — новый корпус 1992 г.; е — храм святых мучениц Софии и Татьяны

Fig. 2. Plan of the N.F. Filatov Children's Hospital No. 13 territory (<https://filatovmos.ru/contacts/plan.html>): а — building plan; б — building 1 (Protkov's House), 1809; в — historical fence with gates; г — outpatient clinic of the children's hospital (old building), 1900; д — new building, 1992; е — Church of the Holy Martyrs Sophia and Tatiana

Для кратковременного отдыха мам с детьми и ожиданий предлагается использовать места в парадной части перед главным корпусом № 15, места для спокойного отдыха находящихся на лечении в стационаре у корпуса № 3, а также, места отдыха и ожидания в самом больничном саду. При корпусе № 2 предполагается разместить площадки настольного тенниса для сотрудников.

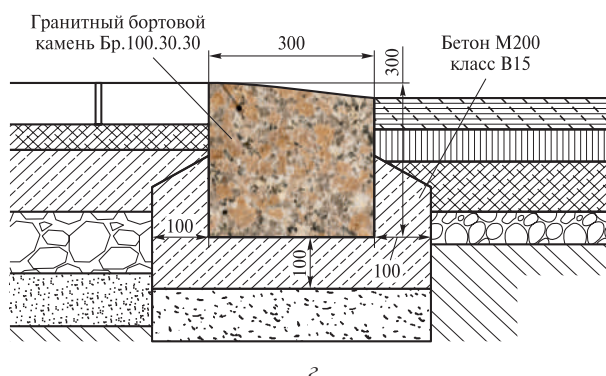
Рекомендовано устройство специального прохода для перемещения пациентов от корпуса № 3 к корпусу № 6.

Для каждой функциональной зоны характерны устройства с учетом использования и рекомендации Департамента здравоохранения г. Москвы по современным стандартам для территорий больниц [1, 2].



Рис. 3. Конструктивный разрез дороги: *а* — дорога, ведущая к главному корпусу; *б* — фрагмент дорожного покрытия с ограничивающим бордюром из брусчатки; *в* — фрагмент больничного сада с новым покрытием-мощением; *г* — конструктивный разрез мощения со «ограничивающим» скошенным гранитным бордюром из брусчатки (фото Н.С. Соловьевой)

Fig. 3. Structural section of the road: *a* — the road leading to the main building; *б* — a fragment of the pavement with a stopper-paving stone kerb; *в* — a fragment of the hospital garden with a new pavement; *г* — a structural section of the paving with a stopper-granite paving stone kerb (photo by N.S. Solovieva)



г

Большое значение имеет организация движения автотранспорта и пешеходов по территории больницы. Установлено, что увеличение пешеходных потоков (по степени их насыщенности) происходит от главного входа к лечебным корпусам № 2 и № 6 — приемное отделение. Пешеходные потоки полностью совпадают с активным автомобильным движением, что повышает риск травмоопасных ситуаций. Разграничение пешеходов и транспорта отсутствует. В связи с этим большое значение приобретает разработка средств по разведению пешеходов и машин, а также выделение пешеходной части. На насыщенном участке — от основного въезда и входа со стороны ул. Садовой-Кудринской рекомендовано снижение автомобильной нагрузки для удобного движения взрослых с детьми, особенно в зимних условиях. Расширение проезда невозможно ввиду наличия зеленых насаждений по обеим сторонам дороги — старовозрастных экземпляров дуба и лиственницы. В этих целях в рамках благоустройства рекомендовано добавить два «кармана» для разезда и оперативного пропуска автомашин и карет скорой помощи. Асфальтовое покрытие дорожной сети не отвечает современным требованиям, предъявляемым к благоустройству больничных территорий [1, 17] и «барьером» для благоприятного пешеходного и транспортного движения. Предлагается реконструировать дорожную сеть, заменив изношенные покрытия. Примеры рекомендуемых покрытий дорог путем мощения из гранитных плит представлены на рис. 3.

В рамках внешнего благоустройства предлагается мощение, в виде нового качественно-

го покрытия из плиток розовато-серого окраса с вкраплениями белого, желтого и розового цветов из гранита Малыгинского, Ташмурунского и Токимовского месторождений. Плитки из токимовского гранита темного — от серо-коричневого до коричнево-красного цвета, применимы для отмостки вдоль цоколей зданий. Плитки из ташмурунского гранита серого цвета с вкраплениями черного применимы для дополнения в мощение из плиток розовато-серого малыгинского гранита. Объединяющим всю территорию может служить мощение из плиток Малыгинского месторождения.

Кроме того, в порядке проведения работ по благоустройству, необходимо отработать траекторию движения автотранспорта по территории больницы, размещение пешеходных зон и участков зеленых насаждений (газонов, цветников), а также систему парковочных мест (рис. 4) [22].

Элементы малых архитектурных форм и садово-парковое оборудование требуют замены вследствие изношенности и отсутствия декоративности. Необходимо установить беседки и арки, выполненные в белой цветовой гамме, что визуально объединит всю территорию в целостную структуру с определенными характеристиками (рис. 5). В рамках проведения благоустроительных работ предлагается установка новых осветительных устройств, что обеспечит видеонаблюдение в целях обеспечения повышенной безопасности. Обилие белого цвета поддерживается продолжительным цветочным оформлением в виде летнего цветения гортензии метельчатой [1, 16].

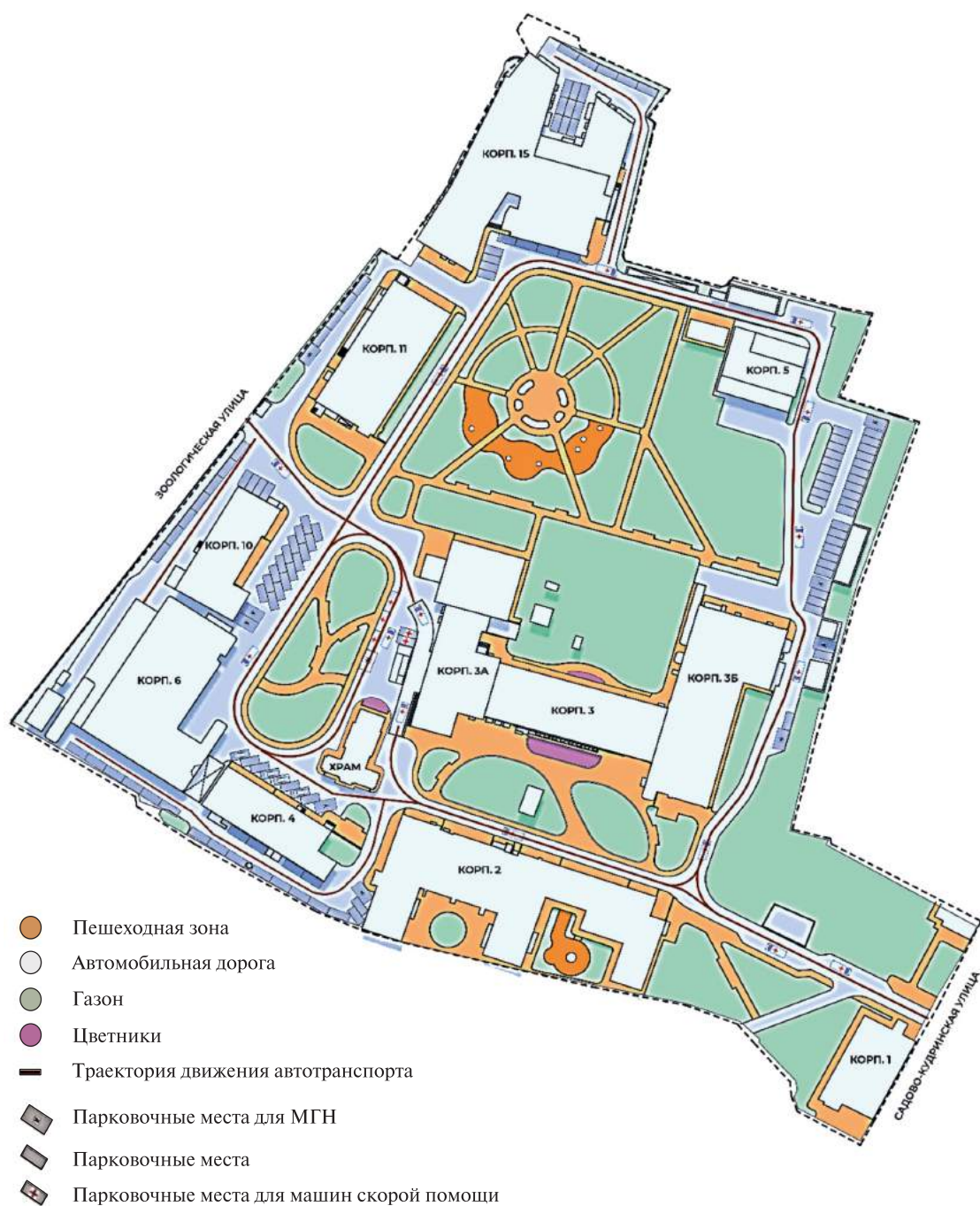


Рис. 4. План общего благоустройства территории ДГКБ № 13 им. Н.Ф. Филатова (<https://filatovmos.ru/contacts/plan.html>)

Fig. 4. Plan of the general improvement of the N.F. Filatov Children's Hospital No. 13 territory (<https://filatovmos.ru/contacts/plan.html>)

Согласно дендрологическим изысканиям, проведенным на территории больницы (в соответствии с ГОСТ Р 55935–2013, ГОСТ Р 55528–2013, Закон г. Москвы от 05.05.1999 г. № 17), на объекте насчитывается 476 деревьев и 777 кустарников. Удалению подлежат 27 деревьев, которые утратили жизнеспособность, частично поросль кустарников. Общая площадь травяного напочвенного покрова составляет 196 268 м². Указывается, что

до 2500 м² газона уничтожено и его необходимо восстановить. Ландшафтно-планировочная организация территории предусматривает типы садово-парковых насаждений в группах и живых изгородях, цветники из многолетних культур, участки культурного газона. Для создания комфортных условий важно сохранить имеющиеся наиболее ценные и жизнеспособные насаждения и нормативное соотношение количества единиц



деревьев, кустарников, цветочно-травянистых растений, композиционные характеристики, характерные для больничных объектов [14, 15]. В состав зеленых насаждений рекомендуются теневыносливые виды хвойных растений (например, ель сербская), что послужит повышению декоративных свойств сада в зимний период. Перед главным корпусом предлагается восстановить исторические группы лиственниц начала XX в. В зоне въезда и перед главным корпусом для создания атмосферы парадности и декоративности следует устроить живую изгородь из сортовой гортензии метельчатой. При размещении растений необходимо учитывать допустимые расстояния между деревьями и кустарниками, расположение подземных коммуникаций, общую планировку территории, взаимосвязи с архитектурными объектами, выявленные видовые точки [15]. В качестве ассортимента древесных растений и обогащения садово-паркового ландшафта предлагаются следующие виды растений:

- из хвойных видов: ель сербская (*Picea omorika*), лиственница европейская (*Larix decidua*);

- из лиственных видов: дуб красный (*Quercus rubra*), каштан конский обыкновенный (*Aesculus hippocastanum*), клен остролистный (*Acer platanoides*), липа европейская «Паллида» (*Tilia europaea Pallida*), яблоня декоративная «Рудольф» (*Malushy bride Rudolph*).

Ассортимент кустарников подобран в соответствии с природно-климатическими условиями, исходя из функциональной направленности объекта и общих санитарно-гигиенических норм, соответствия растений их декоративным качествам, т. е. биологических особенностей роста, их развитию, окраски листвы — различным сезонам, габитусу растений, и их устойчивости к неблагоприятным условиям городской среды.



Рис. 5. Установка малых архитектурных форм на территории больничного сада: а — арка; б — скамьи; в — беседка (автор проекта Н.С. Соловьева)

Fig. 5. Installation of small architectural forms on the territory of the hospital garden: а — arbor; б — arch; в — benches (project author N.S. Solovyova)

Из лиственных рекомендуются следующие виды кустарников:

гортензия метельчатая «Лайм Лайт» (*Hydrangea paniculata* 'Limelight'), кизильник блестящий (*Cotoneaster lucidus*), сирень обыкновенная «Красавица Москвы» (*Syringa vulgaris* 'Krasavitsa Moskvy'), спирея серая «Грефшейм» (*Spiraea cinerea* Grefsheim), спирея березолистная (*Spiraea betulifolia*), чубушник венечный (*Philadelphus coronarius*), форзиция европейская (*Forsythia europaea*), девичий виноград пятилисточковый, или виноград виргинский (*Parhenocissus quinquefolia*) [18].



Рис. 6. Проект внешнего благоустройства территории ДГКБ № 13 им. Н.Ф. Филатова (автор Н.С. Соловьева): 1 — парадная территория перед главным корпусом; 2 — зона спокойного отдыха для пациентов младшего возраста с мамами; 3 — беседка садовая; 4 — арка с фонарем; 5 — специализированная площадка для центра медицинской реабилитации; 6 — арка с вывеской «Сад Филатовской больницы»; 7 — пандус для перемещения больных на каталках и колясках; 8 — навес для перемещения больных на каталках и колясках из корпуса № 3А в корпус № 6; 9 — колясочные для посетителей; 10 — спортивная площадка для сотрудников; 11 — площадки для обеспечения экстренного проезда автомашины скорой помощи; 12 — хозяйственно-техническая зона

Fig. 6. The project of external landscaping of the territory of the N.F. Filatov DGKB No. 13 (author N.S. Solovyova): 1 — the front area in front of the main building; 2 — a quiet recreation area for younger patients with mothers; 3 — a garden gazebo; 4 — an arch with a lantern; 5 — a specialized area for the medical rehabilitation center; 6 — an arch with a sign "Garden of Filatov Hospital"; 7 — a ramp for moving patients on gurneys and wheelchairs; 8 — a canopy for moving patients on wheelchairs and wheelchairs from building No. 3A to building No. 6; 9 — wheelchairs for visitors; 10 — a sports ground for employees; 11 — platforms for providing emergency passage of an ambulance; 12 — economic and technical zone

На генеральном плане территории больницы (рис. 6) представлен проект внешнего благоустройства.

Проектируемые и существующие зеленые насаждения оказывают полезное действие на организм пациентов больницы (антибактерицидное действие фитонцидов, микроклиматическое, психолого-эмоциональное действие). Поэтому на территории детской больницы должна быть организована специальная служба ухода, что особенно важно в центре Москвы. В этих целях для улучшения санитарно-гигиенической обстановки и повышения эстетической привлекательности территории предлагается проведение комплекса санитарно-оздоровительных мероприятий, включающих в себя формовочную обрезку деревьев, санитарные рубки (рубки ухода) поврежденных, сухих растений, деревьев с наклоном более 30°. Учитываются старовозрастные исторические экземпляры растений, в частности экземпляры дуба черешчатого, возрастом более 100 лет, у памятника Филатову [11]. В ходе дендрологического обследования территории больничного сада выявлена утрата старовозрастных лип по главной аллее и около дома Щербатовой, крупных деревьев клена у въезда со стороны ул. Садовой-Кудринской, тополя белого у южной границы. Рекомендуется возместить утрату старовозрастных деревьев аллеи дополнительно посадками таких же видов крупномерных деревьев [15, 16, 22, 25].

Выводы

1. Выявлено историческое наследие на территории Филатовской детской больницы.
2. Изучены исторические характеристики территории.
3. Учтено изменение особенностей территории в течение времени на примере анализа исторических планов и карт.
4. Проведен анализ функционального зонирования территории в контексте с историко-архивными данными и документами.
5. Для каждой функциональной зоны подобраны компоненты благоустройства с учетом текущего использования и рекомендации Департамента здравоохранения г. Москвы по современным стандартам для территорий больниц.
6. Исследован характер движения по территории — транспортного и пешеходного.
7. Разработаны рекомендации по оптимальному составу и структуре типов зеленых насаждений, по организации удобного движения для посетителей с колясками с учетом безбарьерной среды, включающие средства современной навигации, использования качественных материалов дорожной сети, способствующих улучшению эстетических характеристик территории больницы.

8. Рекомендовано обустройство зон отдыха, путем установки, беседок, навесов для колясок и велосипедов, устройство освещения, установке новых опор, и пр. с целью повышения комфорта и безопасности пребывания пациентов и посетителей больницы.

Список литературы

- [1] Здания и помещения медицинских организаций. Правила проектирования (СП 158.13330.2016). Федеральный закон от 14.06.2002 № 73-ФЗ «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации». URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200110514> (дата обращения 12.04.2023).
- [2] Закон города Москвы от 14.07.2000 г. № 26 «Об охране и использовании недвижимых памятников истории и культуры». URL: <https://docs.cntd.ru/document/3621727> (дата обращения 12.04.2023).
- [3] Постановление Правительства Москвы от 18.07.2006 г. № 510-ПП «Об утверждении положений о Государственном реестре недвижимого культурного наследия и об Историко-культурном опорном плане города Москвы». URL: https://www.mos.ru/upload/documents/files/3347/metod_ukazaniya_visual_landshaftnui_analiz.pdf (дата обращения 12.04.2023).
- [4] Постановление Правительства Российской Федерации от 15 июля 2009 года № 569 «Об утверждении положения о Государственной историко-культурной экспертизе». URL: <https://base.garant.ru/195985/> (дата обращения 12.04.2023).
- [5] Капустин И.Н., Рошин А.В., Сафонов А.Г. Проектирование больниц. М.: Стройиздат, 1977. 183.
- [6] Памятники архитектуры Москвы. Территория между Садовым кольцом и границами города XVIII века. (от Земляного до Камер-Коллежского вала). М.: Искусство, 1998. 423 с.
- [7] Уиллер И.Т. Проектирование больниц / под ред. И.Н. Капустина. М.: Медицина, 1972. 192 с.
- [8] Сытин П.В. Из истории московских улиц. М.: Московский рабочий, 1958. 844 с.
- [9] Романюк С.К. Из истории московских переулков. М.: Московский рабочий, 1988. 304 с.
- [10] Федосюк Ю.А. Москва в кольце Садовых. М.: Московский рабочий, 1983. 448 с.
- [11] Николаев Е.В. Классическая Москва. М.: Стройиздат, 1975. 263 с.
- [12] Иконников А.В. Каменная летопись Москвы. М.: Московский рабочий, 1978. 352 с.
- [13] Бусева-Давыдова И.Л., Нащокина М.В. Архитектурные прогулки по Москве. М.: Ворон, 1997. 320 с.
- [14] Вопросы гигиены жилища и лечебно-профилактических учреждений / под ред. проф. Н.М. Данцига. М.: Изд-во Министерства здравоохранения СССР; АМН СССР, 1971. С. 141–143
- [15] Ландшафтная архитектура. Справочник архитектора. Глава «Территории больниц». Киев: Будівельник, 1990. 334 с.
- [16] Историко-культурные исследования, предмет охраны объекта культурного наследия регионального значения (произведение садово-паркового искусства) «Сад детской Филатовской больницы». URL: <https://kartarf.ru/dostoprimechatelnosti/190931-sad-detskoy-filatovskoy-bolnicy> (дата обращения 12.04.2023).

- [17] СанПиН 2.1.3.1375–03. Гигиенические требования к размещению, устройству, оборудованию и эксплуатации больниц, родильных домов и других лечебных стационаров. URL: <https://musorish.ru/wp-content/uploads/2019/02/sanpin-2.1.3.1375-03.pdf> (дата обращения 12.04.2023).
- [18] Сокольская О.Б., Теодоронский В.С. Ландшафтная архитектура. Основы реконструкции и реставрации ландшафтных объектов. М.; СПб.: Лань, 2018. 328 с.
- [19] Скачкова М.Е., Монастырская М.Е. Введение в градостроительную деятельность. Нормативно-правовое и информационное обеспечение. СПб.: Лань, 2019. 268 с.
- [20] Соловьев К.А., Степанова Д.С. История архитектуры и строительной техники. СПб.: Лань, 2018. 540 с.
- [21] Теодоронский В.С., Ерзин И.В. Основы архитектуры и градостроительства. Функциональное зонирование и планировка населенных мест. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019, 93 с
- [22] Теодоронский В.С. Садово-парковое строительство и хозяйство. М.: Академия, 2019. 287 с.
- [23] Теодоронский В.С., Боговая И.О. Ландшафтная архитектура с основами проектирования. М.: Инфра-М, 2021. 287 с.
- [24] 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. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-2-57-63
- [25] Разумовский Ю.В., Фурсова Л.М., Теодоронский В.С. Ландшафтное проектирование. М.: Инфра-М, 2021. 139 с.
- [26] Комаров Н.А., Васильева О.И., Новожилов Ю.Н. Архитектурная графика. М.: МГУЛ, 2011. 14 с.
- [27] Теодоронский В.С. Озеленение населенных мест. Градостроительные основы. СПб.: Лань, 2022. 242
- [28] Теодоронский В.С., Боговая И.О. Ландшафтная архитектура. Теория и практика. М.: Инфра-М, 2022. 387 с.
- [29] Воронина О.Н., Воронина А.В. От ландшафтной архитектуры к ландшафтной инфраструктуре. «Нижегородский опыт». Нижний Новгород: Кварц, 2022. 386 с.
- [30] Дормидонтова В.В., Юдина А.И., Ханбабаева О.Е. Типологические принципы формирования архитектурно-ландшафтной композиции многофункциональных парков. М.: МЭСХ, 2021. 130 с.
- [31] Дормидонтова В.В., Кузнецова К.И. Архитектурно-ландшафтный ансамбль Дворца пионеров на Воробьевых горах. История и современность // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 5. С. 12–19. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-5-12-19
- [32] Карташова Н.П., Кругляк В.В. Ландшафтная организация территорий объектов культурно-бытового назначения // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 5. С. 71–82. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-5-71-82

Сведения об авторе

Теодоронский Владимир Сергеевич — д-р с.-х. наук, профессор, академик РАЕН, профессор, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1, vst01@mail.ru

Поступила в редакцию 01.06.2023.

Одобрено после рецензирования 21.12.2023.

Принята к публикации 06.02.2024.

FEATURES OF EXTERNAL LANDSCAPING OF THE FILATOV CHILDREN'S HOSPITAL (MOSCOW) TERRITORY

V.S. Teodoronskiy

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

vst01@mail.ru

This article provides suggestions and practical recommendations for the territory improvement around the Filatov Children's Hospital (Moscow), one of the leading children's city hospitals, on the territory of which the departments of the pediatric faculty of the N.I. Pirogov Medical University are located. The need to create favourable and comfortable sanitary and hygienic conditions for patients, to organize and improve the Medical Rehabilitation Center with outdoor areas for active recreation and sensory equipment, to introduce aesthetically expressive small architectural forms, and to create green spaces with high decorative properties is considered. The organization of barrier-free traffic by various means, in particular, stoppers and approaches to medical buildings, and the use of paving types made of durable decorative materials are suggested.

Keywords: landscape arrangement, barrier-free movement, allocation of recreation areas

Suggested citation: Teodoronskiy V.S. *Osobennosti vneshnego blagoustroystva territorii Detskoy gorodskoy klinicheskoy bol'nitsy № 13 imeni N.F. Filatova (Moskva)* [Features of external landscaping of the Filatov Children's hospital (Moscow) territory]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 2, pp. 93–104. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-93-104

References

- [1] *Zdaniya i pomeshcheniya meditsinskikh organizatsiy. Pravila proektirovaniya (SP 158.13330.2016). Federal'nyy zakon ot 14.06.2002 № 73-FZ «Ob ob'ektakh kul'turnogo naslediya (pamyatnikakh istorii i kul'tury) narodov Rossiyskoy Federatsii»* [Buildings and premises of medical organizations. Design rules (SP 158.13330.2016). Federal Law of June 14, 2002 no. 73-FZ «On objects of cultural heritage (historical and cultural monuments) of the peoples of the Russian Federation»]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200110514> (accessed 12.04.2023).
- [2] *Zakon goroda Moskvy ot 14.07.2000 g. № 26 «Ob okhrane i ispol'zovanii nedvizhimykh pamyatnikov istorii i kul'tury»* [Law of the city of Moscow dated July 14, 2000 no. 26 «On the protection and use of immovable monuments of history and culture»]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/3621727> (accessed 12.04.2023).
- [3] *Pozanichline Private's Moskvy ot 18.07.2006 g. № 510-PP «Ob utverzhdenii pichohenry o Gosudarstvennom restore nedvizhimogo kul'turnogo naslediya i ob Istoriko-kul'turnom opornom plane goroda Moskvy»* [Decree of the Moscow Government of July 18, 2006 no. 510-PP «On approval of the provisions on the State Register of Immovable Cultural Heritage and on the Historical and Cultural Basic Plan of the City of Moscow»]. Available at: https://www.mos.ru/upload/documents/files/3347/metod_ukazaniya_visual_landshaftnui_analiz.pdf (accessed 12.04.2023).
- [4] *Postanovlenie Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 15 iyulya 2009 goda № 569 «Ob utverzhdenii polozheniya o Gosudarstvennoy istoriko-kul'turnoy ekspertize»* [Decree of the Government of the Russian Federation of July 15, 2009 no. 569 «On approval of the regulations on the State Historical and Cultural Expertise»]. Available at: <https://base.garant.ru/195985/> (accessed 12.04.2023).
- [5] Kapustin I.N., Roshchin A.V., Safonov A.G. *Proektirovanie bol'nits* [Hospital design]. Moscow: [Sroyizdat], 1977, 183 p.
- [6] *Pamyatniki arkhitektury Moskvy. Territoriya mezhdu Sadovym kol'tsom i granitsami goroda XVIII veka. (ot Zemlyanogo do Kamer-Kollezhskego vala)* [Architectural monuments of Moscow. The territory between the Garden Ring and the city boundaries of the 18th century. (from Zemlyanoy to Kamer-Kollezhsky Val)]. Moscow: Iskusstvo [Art], 1998, 423 p.
- [7] Wheeler I.T. *Proektirovanie bol'nits* [Hospital design] / Ed. I.N. Kapustin. Moscow: Meditsina [Medicine], 1972, 192 p.
- [8] Sytin P.V. *Iz istorii moskovskikh ulits* [From the history of Moscow streets]. Moscow: Moskovskiy rabochiy [Moscow worker], 1958, 844 p.
- [9] Romanyuk S.K. *Iz istorii moskovskikh pereulkov* [From the history of Moscow lanes]. Moscow: Moskovskiy rabochiy [Moscow worker], 1988, 304 p.
- [10] Fedosyuk Yu.A. *Moskva v kol'tse Sadovykh* [Moscow in the Garden ring]. Moscow: Moskovskiy rabochiy [Moscow worker], 1983, 448 p.
- [11] Nikolaev E.V. *Klassicheskaya Moskva* [Classic Moscow]. Moscow: Sroyizdat, 1975, 263 p.
- [12] Ikonnikov A.V. *Kamennaya letopis' Moskvy* [Stone chronicle of Moscow]. Moscow: Moskovskiy rabochiy [Moscow worker], 1978, 352 p.
- [13] Buseva-Davydova I.L., Nashchokina M.V. *Arkhitekturnye progulki po Moskve* [Architectural walks around Moscow]. Moscow: Voron, 1997, 320 p.
- [14] *Voprosy gigieny zhilishcha i lechebno-proflakticheskikh uchrezhdeniy* [Issues of hygiene of the home and medical institutions]. Ed. N.M. Dantzig. Moscow: M-vo zdravookhraneniya SSSR. Akad. med. nauk SSSR [Ministry of Health of the USSR. Academician honey. Sciences USSR], 1971, pp. 141–143.
- [15] *Landshaftnaya arkhitektura. Spravochnik arkhitekatora. Glava «Territorii bol'nits»* [Landscape architecture. Architect's Handbook. Chapter «Hospital Territories»]. Kyiv: Budivelnik, 1990, 334 p.
- [16] *Istoriko-kul'turnye issledovaniya, predmet okhrany ob'ekta kul'turnogo naslediya regional'nogo znacheniya (proizvedenie sadovo-parkovogo iskusstva) «Sad detskoy Filatovskoy bol'nitsy»* [Historical and cultural research, the subject of protection of a cultural heritage site of regional significance (a work of landscape art) «Garden of the Filatov Children's Hospital»]. Available at: <https://kartarf.ru/dostoprimechatelnosti/190931-sad-detskoy-filatovskoy-bolnicy> (accessed 12.04.2023).

- [17] SanPiN 2.1.3.1375–03. *Gigienicheskie trebovaniya k razmeshcheniyu, ustroystvu, oborudovaniyu i ekspluatatsii bol'nits, rodil'nykh domov i drugikh lechebnykh stacionarov* [SanPiN 2.1.3.1375–03. Hygienic requirements for the placement, design, equipment and operation of hospitals, maternity hospitals and other medical hospitals]. Available at: <https://musorish.ru/wp-content/uploads/2019/02/sanpin-2.1.3.1375-03.pdf> (accessed 12.04.2023).
- [18] Sokol'skaya O.B., Teodoronskiy V.S. *Landshaftnaya arkhitektura. Osnovy rekonstruktsii i restavratsii landshaftnykh ob'ektov* [Landscape architecture. Fundamentals of reconstruction and restoration of landscape objects]. Moscow–St. Petersburg: Lan', 2018, 328 p.
- [19] Skachkova M.E., Monastyrskaya M.E. *Vvedenie v gradostroitel'nyuyu deyatel'nost'. Normativno-pravovoe i informatsionnoe obespechenie* [Introduction to urban planning. Regulatory and information support]. St. Petersburg: Lan', 2019, 268 p.
- [20] Solov'ev K.A., Stepanova D.S. *Istoriya arkhitektury i stroitel'noy tekhniki* [History of architecture and construction techniques]. St. Petersburg: Lan', 2018, 540 p.
- [21] Teodoronskiy V.S., Erzin I.V. *Osnovy arkhitektury i gradostroitel'stva. Funktsional'noe zonirovaniye i planirovka naseleennykh mest* [Fundamentals of architecture and urban planning. Functional zoning and planning of populated areas]. Moscow: MSTU im. N.E. Bauman, 2019, 93 p.
- [22] Teodoronskiy V.S. *Sadovo-parkovoe stroitel'stvo i khozyaystvo* [Landscape construction and farming]. Moscow: Academy, 2019, 287 p.
- [23] Teodoronskiy V.S., Bogovaya I.O. *Landshaftnaya arkhitektura s osnovami proektirovaniya* [Landscape architecture with design fundamentals]. Moscow: Infra-M, 2021, 287 p.
- [24] Teodoronskiy V.S. *O metodakh vizual'no-landshaftnoy otsenki territoriy pri sozdaniy 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
- [25] Razumovskiy Yu.V., Fursova L.M., Teodoronskiy V.S. *Landshaftnoe proektirovaniye* [Landscape design]. Moscow: Infra-M, 2021, 139 p.
- [26] Komarov N.A., Vasil'eva O.I., Novozhilov Yu.N. *Arkhitekturnaya grafika* [Architectural graphics]. Moscow: MSFU, 2011, 14 p.
- [27] Teodoronskiy V.S. *Ozeleneniye naseleennykh mest. Gradostroitel'nye osnovy* [Greening populated areas. Urban planning principles]. St. Petersburg: Lan', 2022, 242
- [28] Teodoronskiy V.S., Bogovaya I.O. *Landshaftnaya arkhitektura. Teoriya i praktika* [Landscape architecture. Theory and practice]. Moscow: Infra-M, 2022, 387 p.
- [29] Voronina O.N., Voronina A.V. *Ot landshaftnoy arkhitektury k landshaftnoy infrastrukture. «Nizhegorodskiy opyt»* [From landscape architecture to landscape infrastructure. «Nizhny Novgorod experience»]. Nizhny Novgorod: Quartz, 2022, 386 p.
- [30] Dormidontova V.V., Yudina A.I., Khanbabaeva O.E. *Tipologicheskie printsipy formirovaniya arkhitekturno-landshaftnoy kompozitsii mnogofunktsional'nykh parkov* [Typological principles for the formation of architectural and landscape composition of multifunctional parks]. Moscow: MESH, 2021, 130 p.
- [31] Dormidontova V.V., Kuznetsova K.I. *Arkhitekturno-landshaftnyy ansambl' Dvortsa pionerov na Vorobyovy gory. Istoriya i sovremennost'* [Architectural landscape ensemble of Pioneer palace on Vorobyovy gory. History and modernity]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 5, pp. 12–19. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-5-12-19
- [32] Kartashova N.P., Kruglyak V.V. *Landshaftnaya organizatsiya territoriy ob'ektov kul'turno-bytovogo naznacheniya* [Landscaping of cultural and public amenities objects]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 5, pp. 71–82. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-5-71-82

Author's information

Teodoronskiy Vladimir Sergeevich — Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Member of the Union of Architects of the Russian Federation, Professor of the Department of Landscape Architecture and Garden and Park Construction of the BMSTU (Mytishchi branch), vst01@mail.ru

Received 01.06.2023.

Approved after review 21.12.2023.

Accepted for publication 06.02.2024.

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

ДРЕВЕСНЫЕ РАСТЕНИЯ ПРИРОДНОЙ ФЛОРЫ БАШКОРТОСТАНА В КОЛЛЕКЦИЯХ И ЭКСПОЗИЦИЯХ ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО БОТАНИЧЕСКОГО САДА-ИНСТИТУТА (г. УФА)

Н.В. Полякова✉, Ф.К. Мурзабулатова, Н.А. Рязанова,
Р.Г. Абдуллина, Р.А. Билалова

Южно-Уральский ботанический сад-институт — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ЮУБСИ УФИЦ РАН), Россия, 450080, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Менделеева, д. 195, корп. 3

botsad@anrb.ru

Представлены результаты анализа дендрологической коллекции Южно-Уральского ботанического сада-института Уфимского федерального исследовательского центра РАН, насчитывающей 1935 таксонов. Выделена группа из 48 видов природной флоры Башкортостана. Установлено, что 27 видов из 48 занесены в список Международного союза охраны природы и природных ресурсов и являются особо охраняемыми на территории других субъектов Российской Федерации, один из видов занесен в Красную книгу Башкортостана. Выявлены хозяйственно значимые группы древесных растений природной флоры Башкортостана: лекарственные — 46 видов, древесно-целлюлозные — 20, медоносные — 14, декоративные — 30, пищевые — 9. Охарактеризовано жизненное состояние древесных растений выделенных групп: в настоящее время все они относятся к I и II категориям состояния, т. е. являются здоровыми или имеют слабые повреждения. Указано, что все древесные растения природной флоры Башкортостана находятся на участке естественного леса, в дендрарии и частично — на коллекционных участках, а также спорадически по всей территории Ботанического сада-института.

Ключевые слова: природная флора, древесные растения, дендрологическая коллекция, Республика Башкортостан

Ссылка для цитирования: Полякова Н.В., Мурзабулатова Ф.К., Рязанова Н.А., Абдуллина Р.Г., Билалова Р.А. Древесные растения природной флоры Башкортостана в коллекциях и экспозициях Южно-Уральского ботанического сада-института (г. Уфа) // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 2. С. 105–115. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-105-115

Кпервоочередным задачам ботанических садов относится сохранение биоразнообразия природных систем и растительных ресурсов стран и континентов, а также редких и исчезающих растений [1]. В связи с этим ими проводятся сбор, уход и наблюдение за ритмами развития коллекций растений различных жизненных форм. Создание экспозиций растений по тематикам географического распространения, хозяйственной ценности, охраняемого статуса стало популярным направлением научно-исследовательской деятельности. Одним из развивающихся направлений, особенно в 2010–2020-е годы является создание экспозиции растений природной флоры региона [2–6]. Эти экспозиции определяются как многоцелевые и одновременно представляют растения местной флоры, редкие, охраняемые растения из различных хозяйственно-ценных групп. Экспозиции позволяют расширять и совершенствовать эколого-просветительскую деятельность ботанических садов.

Южно-Уральский ботанический сад-институт Уфимского федерального исследовательского центра РАН (ЮУБСИ УФИЦ РАН) создан в 1932 г.

и к настоящему времени содержит крупные коллекции древесных и травянистых растений [7]. Большую часть коллекционного фонда составляют древесные коллекции, на базе которых проводятся многолетние исследования комплексного интродукционного изучения отдельных родовых комплексов древесных растений [8–14]. Наряду с созданными в Ботаническом саду-институте имеется экспозиция под названием «Участок естественного леса», сохранившаяся до сих пор с момента учреждения организации. В данной экспозиции представлены древесные виды местной флоры. Кроме того, виды древесной флоры региона входят в состав других коллекций и экспозиций.

Цель работы

Цель работы — характеристика современного состояния древесных растений природной флоры Башкортостана в коллекциях Южно-Уральского ботанического сада-института.

Материалы и методы

Объект исследований — дендрокolleкция Южно-Уральского ботанического сада-института, включающая в себя к концу 2022 г. 1935 таксонов

деревьев и кустарников. Выполнен анализ дендрологических коллекций, в результате которого установлено, что природная флора представлена 48 видами, относящимися к 33 родам и 19 семействам. Проведено ранжирование семейств по количеству видов, показавшее, что наиболее богаты видами семейства *Salicaceae* и *Rosaceae* (11 и 10 видов соответственно), *Betulaceae* включает в себя 5 видов, *Pinaceae* и *Ericaceae* — по 3 вида, *Cupressaceae* и *Fabaceae* — по 2 вида, остальные 11 семейств — одновидовые (латинские названия видов приведены по литературному источнику [15]).

Статус охраны древесных видов природной флоры определяли согласно списку Международного союза охраны природы и природных ресурсов (МСОП) [16].

В ходе анализа хозяйственной значимости видов природной флоры были выделены группы древесных растений в соответствии с классификацией А.А. Гроссгейма [17, 18]: лекарственные, древесно-целлюлозные, медоносные, декоративные, пищевые.

Жизненное состояние древесных растений природной флоры в Ботаническом саду-институте определяли по методике В.А. Алексева [19]:

1 категория — здоровые деревья, не имеющие внешних признаков повреждения, с густой, нормально развитой кроной; сухие ветви в кроне отсутствуют; повреждения листьев незначительны (< 10 %);

2 категория — поврежденные (ослабленные) деревья; крона деревьев разрежена на 30 %; повреждения листьев болезнями, вредителями, пожарами и другими явлениями составляют 30 %; доля сухих ветвей около 30 %;

3 категория — сильно ослабленные или поврежденные деревья; разреженность кроны составляет около 60 %; доля сухих и усыхающих ветвей — 60 %; наблюдается усыхание верхушки кроны; повреждение всей площади листьев различными факторами составляет около 60 %;

4 категория — отмирающие деревья; густота кроны менее 15...20 %; потеря листьев достигает более 60 %; доля сухих и усыхающих ветвей более 70 %; оставшиеся листья имеют бледную окраску с признаками хлороза или некроза; в основании стволов признаки заселения стволовых вредителей;

5 категория — свежий сухостой: деревья, погибшие менее одного года тому назад; присутствуют остатки сухих не опавших листьев; стволы заселены стволовыми вредителями и грибами;

6 категория — старый сухостой: погибшие в предыдущие годы деревья; ветви и кора постепенно утрачиваются.

Жизненное состояние видов определяли по формуле В.А. Алексева [19]:

$$Ln = \frac{(100n_1 + 70n_2 + 40n_3 + 10n_4 + 5n_5)}{N},$$

где Ln — жизненное состояние;

n_1 — число здоровых деревьев;

n_2 — ослабленных;

n_3 — сильно ослабленных;

n_4 — отмирающих;

n_5 — сухостой;

N — общее число экземпляров данного вида.

В соответствии с полученными значениями Ln обследованные древесные виды были поделены на четыре категории состояния (КС):

КС I — насаждения здоровые, у которых $Ln = 80...100$ %;

КС II — насаждения со слабым повреждением древостоя, у которых $Ln = 50...79$ %;

КС III — насаждения со значительными повреждениями, у которых $Ln = 20...49$ %.

КС IV — насаждения усыхающие, у которых Ln менее 20 %.

Результаты и обсуждение

Основным направлением работы с древесными растениями в Ботаническом саду-институте является интродукция, оценка перспективности и интродукционной устойчивости новых для Республики Башкортостан таксонов древесно-кустарниковых растений в целях расширения ассортимента культивируемых хозяйственно-ценных растений, используемых, в частности, в озеленении.

В настоящее время в составе дендрокolleкции представлены следующие коллекционные и экспозиционные участки:

— фрутицетум (участок цветочно-декоративных и декоративно-лиственных древесно-кустарниковых растений) — 358 таксонов;

— кониферетум (участок хвойных растений) — 210 таксонов;

— участок древовидных лиан (в том числе видов и сортов княжиков и клематисов — 86 таксонов) — 181 таксон;

— участок хвойных карликовых форм — 84 таксона;

— дендрологический участок (дендрарий) — 70 таксонов;

— участок боярышников — 49 таксонов;

— сирингарий (участок видов и сортов сирени) — 276 таксонов;

— участок родового комплекса рябин — 41 таксон;

— вересковый сад (участок видов и сортов рододендрона, эрики и вереска) — 35 таксонов;

— участок родового комплекса кленов — 35 таксонов;

— участок видов и сортов чубушника — 31 таксон;

- популетум (коллекционный участок тополей) — 25 таксонов;
- участок родового комплекса жимолостей — 24 таксона;
- салицетум (коллекционный участок ив) — 36 таксонов;
- участок естественного леса — 9 таксонов;
- березовая аллея — 2 таксона;
- старая школка — 1 таксон.

Виды природной флоры сосредоточены в основном в двух экспозициях — участок естественного леса и дендрологический участок (дендрарий), некоторое количество их произрастает в других коллекциях (табл. 1). Из 1935 таксонов древесных растений коллекционного фонда Южно-Уральского ботанического сада-института 48 видов из 19 семейств являются видами природной флоры Башкортостана.

Участок естественного леса занимает 2 га из общих 25 га Ботанического сада-института и состоит из нескольких небольших участков: двух — в партере на входе в сад (рис. 1) и узкой полосы вдоль забора по северной границе Ботанического сада-института. Поскольку территория сада граничит с довольно обширной территорией лесопарка им. Лесоводов Башкирии, то участки естественного леса Ботанического сада-института являются продолжением естественных насаждений. При реконструкции территории Ботанического сада-института эти участки решено было оставить в неприкосновенности, чтобы составить из них экспозицию естественного леса. Основные древесные породы на этих участках: *Acer platanoides*, *Quercus robur*, *Tilia cordata*, *Prunus padus*, *Corylus avellana*, *Rubus caesius*, *Populus tremula*, *Ulmus laevis*, редко встречается *Alnus glutinosa*.

Т а б л и ц а 1

Список древесных растений природной флоры Башкортостана в коллекциях Южно-Уральского ботанического сада-института

List of ligneous plants of the natural flora of Bashkortostan in the collections of South Ural Botanical Garden-Institute

| № | Латинское название | Русское название | Хозяйственно-ценное значение | Экспозиция ботанического сада |
|-----------------------------------|---|---------------------------|---|--|
| Сем. <i>Cupressaceae</i> F. Neger | | | | |
| 1 | <i>Juniperus communis</i> L.* | Можжевельник обыкновенный | Декоративное, лекарственное | Кониферетум |
| 2 | <i>Juniperus sabina</i> L.* | Можжевельник казацкий | То же | То же |
| Сем. <i>Pinaceae</i> Lindl. | | | | |
| 3 | <i>Abies sibirica</i> Ledeb.* | Пихта сибирская | Источник древесины, декоративное, лекарственное | «←» |
| 4 | <i>Picea obovata</i> Ledeb. | Ель сибирская | То же | «←» |
| 5 | <i>Pinus sylvestris</i> L. | Сосна обыкновенная | «←» | Кониферетум, дендрарий |
| Сем. <i>Betulaceae</i> S. F. Gray | | | | |
| 6 | <i>Alnus glutinosa</i> (L.) Gaertn. | Ольха черная | Источник древесины, декоративное, лекарственное | Участок естественного леса |
| 7 | <i>Alnus alnobetula</i> (Ehrh.) K.Koch subsp. <i>fruticosa</i> (Rupr.) Raus | Ольха кустарниковая | То же | Фрутицетум |
| 8 | <i>Betula pendula</i> Roth | Береза повислая | Источник древесины, декоративное, лекарственное, пыльценозное | Березовая аллея, дендрарий, участок естественного леса |
| 9 | <i>Betula pubescens</i> Ehrh.* | Береза пушистая | То же | То же |
| 10 | <i>Corylus avellana</i> L.* | Лещина обыкновенная | Пищевое | Участок естественного леса |
| Сем. <i>Caprifoliaceae</i> Juss. | | | | |
| 11 | <i>Lonicera tatarica</i> L. | Жимолость татарская | Лекарственное, плоды ядовиты | Дендрарий |
| Сем. <i>Celastraceae</i> R. Br. | | | | |
| 12 | <i>Euonymus verrucosa</i> Scop.* | Бересклет бородавчатый | Лекарственное, декоративное | То же |
| Сем. <i>Elaeagnacea</i> Juss. | | | | |
| 13 | <i>Elaeagnus angustifolia</i> L. | Лох узколистный | Лекарственное, плоды съедобны | Старая школка за теплицей |

Продолжение табл. 1

| № | Латинское название | Русское название | Хозяйственно-ценное значение | Экспозиция ботанического сада |
|---------------------------------|--|--------------------------------|--|---|
| Сем. <i>Ericaceae</i> Juss. | | | | |
| 14 | <i>Ledum palustre</i> L.* | Багульник болотный | Лекарственное, ядовитое | Вересковый сад |
| 15 | <i>Vaccinium corymbosum</i> L.* | Голубика высокорослая | Пищевое, лекарственное | То же |
| 16 | <i>Vaccinium myrtillus</i> L.* | Черника | То же | «—» |
| Сем. <i>Fabaceae</i> Lindl. | | | | |
| 17 | <i>Caragana frutex</i> (L.) C. Koch* | Карагана кустарниковая | Медонос, лекарственное, почвоукрепляющее | Фрутицетум |
| 18 | <i>Chamaecytisus ruthenicus</i> (Fischer ex Wołoszczak) Klásk. | Ракитник русский | Лекарственное, ядовитое, декоративное | То же |
| Сем. <i>Fagaceae</i> Dumort. | | | | |
| 19 | <i>Quercus robur</i> L.* | Дуб черешчатый | Источник древесины, лекарственное | По всей территории спорадически |
| Сем. <i>Rhamnaceae</i> Juss. | | | | |
| 20 | <i>Frangula alnus</i> L.* | Крушина ломкая или ольховидная | Лекарственное, плоды ядовиты | Дендрарий |
| Сем. <i>Ranunculaceae</i> Juss. | | | | |
| 21 | <i>Atragene speciosa</i> L. | Княжик красивый | Декоративное, лекарственное | Участок древовидных лиан |
| Сем. <i>Rosaceae</i> Juss. | | | | |
| 22 | <i>Amygdalus nana</i> L.* | Миндаль низкий | Декоративное, медоносное, лекарственное | Фрутицетум |
| 23 | <i>Cerasus fruticosa</i> Pall.* | Вишня кустарниковая | Пищевое, декоративное, лекарственное | То же |
| 24 | <i>Crataegus sanguinea</i> Pall.* | Боярышник кроваво-красный | Лекарственное, декоративное, медоносное | Участок боярышников |
| 25 | <i>Prunus padus</i> L.* | Черемуха обыкновенная | Лекарственное, пищевое | Участок естественного леса, фрутицетум |
| 26 | <i>Rosa acicularis</i> Lindl.* | Роза иглистая | Лекарственное, декоративное | Березовая аллея |
| 27 | <i>Rosa majalis</i> Herrm. | Роза майская | То же | Участок естественного леса |
| 28 | <i>Rubus idaeus</i> L. | Малина обыкновенная | Лекарственное, пищевое | Старая школка за теплицей |
| 29 | <i>Rubus caesius</i> L.* | Ежевика сизая | Пищевое, лекарственное, медоносное | По всей территории |
| 30 | <i>Sorbus aucuparia</i> L. | Рябина обыкновенная | Лекарственное, пищевое, декоративное, пыльценозное | Участок родового комплекса рябин |
| 31 | <i>Spiraea crenata</i> L.* | Спирея городчатая | Лекарственное, декоративное | Фрутицетум |
| Сем. <i>Salicaceae</i> Mirb. | | | | |
| 32 | <i>Populus alba</i> L.* | Тополь белый | Лекарственное, используется в пчеловодстве для выработки прополиса | Популетум |
| 33 | <i>Populus tremula</i> L.* | Тополь дрожащий, или осина | Лекарственное, источник древесины, используется в пчеловодстве для выработки прополиса | Фрутицетум, по всей территории спорадически |
| 34 | <i>Populus nigra</i> L. | Тополь черный | Лекарственное, источник древесины, используется в лесомелиорации | Салицетум |
| 35 | <i>Salix acutifolia</i> Willd. | Ива остролистная | Лекарственное, декоративное, источник древесины | То же |
| 36 | <i>Salix alba</i> L. | Ива белая | То же | «—» |
| 37 | <i>Salix caprea</i> L.* | Ива козья | «—» | «—» |
| 38 | <i>Salix dasyclados</i> Wimm.* | Ива шерстистопобеговая | «—» | «—» |

| № | Латинское название | Русское название | Хозяйственно-ценное значение | Экспозиция ботанического сада |
|--|-----------------------------|---|--|---------------------------------------|
| Сем. <i>Salicaceae</i> Mirb. | | | | |
| 39 | <i>Salix fragilis</i> L. | Ива ломкая, или ракита | Лекарственное, декоративное, источник древесины | Салицетум |
| 40 | <i>Salix pentandra</i> L. | Ива пятитычинковая | То же | То же |
| 41 | <i>Salix triandra</i> L.* | Ива трехтычинковая | «→» | «→» |
| 42 | <i>Salix viminalis</i> L. | Ива корзиночная, или прутьевидная | «→» | «→» |
| Сем. <i>Sambucaceae</i> Batsch ex Borkh. | | | | |
| 43 | <i>Sambucus racemosa</i> L. | Бузина красная, или кистистая | Лекарственное, молодые побеги и незрелые плоды ядовиты | Фрутицетум, дендрарий |
| Сем. <i>Sapindaceae</i> Juss. | | | | |
| 44 | <i>Acer platanoides</i> L. | Клен остролистный L. | Декоративное, медоносное | По всей территории |
| Сем. <i>Thymelaeaceae</i> Juss. | | | | |
| 45 | <i>Daphne mezereum</i> L.* | Волчегородник смертельный, или обыкновенный | Лекарственное, ядовитое | Дендрарий |
| Сем. <i>Tiliaceae</i> Juss. | | | | |
| 46 | <i>Tilia cordata</i> Mill* | Липа сердцевидная, или мелколистная | Медонос, источник древесины, лекарственное, декоративное | Дендрарий, Фрутицетум |
| Сем. <i>Ulmaceae</i> Mirb. | | | | |
| 47 | <i>Ulmus laevis</i> Pall.* | Вяз гладкий | Источник древесины, лекарственное | Дендрарий, участок естественного леса |
| Сем. <i>Viburnaceae</i> Rafin. | | | | |
| 48 | <i>Viburnum opulus</i> L. | Калина обыкновенная | Пищевое, лекарственное, декоративное | Фрутицетум |

*Виды, включенные в «Аннотированный перечень редких и находящихся под угрозой исчезновения видов семенных растений, особо охраняемых в пределах России» из списка МСОП.

Дендрарий был заложен в 1938 г. и является одним из наиболее старых коллекционных участков (рис. 2). Здесь на площади 1 га были высажены древесные и кустарниковые породы, распространенные в лесах Башкортостана и на территории Российской Федерации, для ознакомления посетителей с местной древесной флорой. Древесные виды природной флоры Башкортостана на территории дендрария представлены следующими видами: *Pinus sylvestris*, *Betula pendula*, *Betula pubescens*, *Lonicera tatarica*, *Sambucus racemosa*, *Tilia cordata*, *Ulmus laevis*.

Из 48 древесных видов природной флоры коллекционного фонда Южно-Уральского ботанического сада-института 27 внесены в «Аннотированный перечень редких и находящихся под угрозой исчезновения видов семенных растений, особо охраняемых в пределах России» из списка МСОП [16]. Видов из Красной книги России среди них нет, однако они имеют охраняемый статус других объектов Российской Федерации. В Красную книгу Башкортостана внесены *Ledum palustre*, культивируемый на участке верескового сада.

Все виды природной флоры имеют большое значение для народного хозяйства и относятся к различным хозяйственно значимым группам (см. табл. 1). Практически все они (46 видов из 48) являются *лекарственными* растениями, используемыми в основном в народной медицине, при этом у древесных растений в качестве лекарственного сырья используются практически все части: кора, побеги, листья, цветки, плоды. Особая ценность древесных лекарственных растений состоит в том, что они составляют долговечную базу лекарственных ресурсов [20]. Из 48 древесных видов природной флоры 20 являются источником ценной древесины для перерабатывающей промышленности и относятся к группе *древесно-целлюлозных* растений [21]. Особое значение древесные растения имеют для отрасли пчеловодства и являются ценными медоносами [22, 23]. В коллекциях Ботанического сада-института культивируется 14 *медоносных* видов древесной природной флоры, в числе которых основной медонос и визитная карточка Республики Башкортостан — *Tilia cordata* [24]. Большинство древесных растений обладают декоративными свойствами



Рис. 1. Участок естественного леса в партере (на переднем плане *Ulmus laevis* — вяз голый)

Fig. 1. Plot of natural forest in the parterre (*Ulmus laevis* in the foreground)

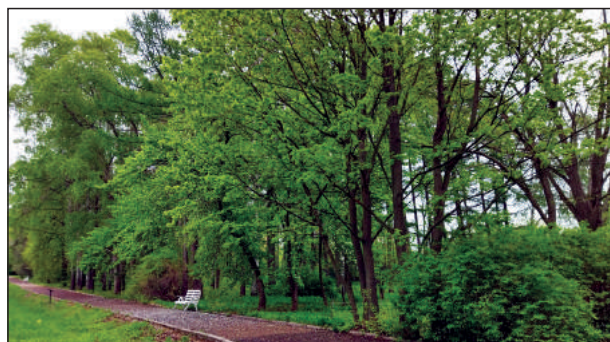


Рис. 2. Дендрарий Ботанического сада-института

Fig. 2. The Botanical Garden Arboretum

и активно используются в озеленении, при этом зеленые насаждения имеют не только эстетическое, но и рекреационное, санитарное и экологическое значение [25, 26]. Из 48 древесных видов природной флоры 30 относятся к декоративным. В группу пищевых растений вошли 9 видов природной флоры Башкортостана: *Corylus avellana*, *Vaccinium corymbosum*, *Vaccinium myrtillus*, *Cerasus fruticosa*, *Prunus padus*, *Rubus idaeus*, *Rubus caesius*, *Sorbus aucuparia*, *Viburnum opulus*.

Жизненное состояние древесных видов природной флоры Башкортостана определяли по шкале и формуле В.А. Алексеева [19] (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Жизненное состояние древесных растений природной флоры в коллекциях Южно-Уральского ботанического сада-института

Life state of ligneous plants of natural flora in the collections of South Ural Botanical Garden-Institute

| № | Латинское название | Количество, шт. | Жизненное состояние, % | Категория состояния вида |
|-----------------------------------|---|-----------------|------------------------|--------------------------|
| Сем. <i>Cupressaceae</i> F. Neger | | | | |
| 1 | <i>Juniperus communis</i> L. | 7 | 100 | I |
| 2 | <i>Juniperus sabina</i> L. | 12 | 100 | I |
| Сем. <i>Pinaceae</i> Lindl. | | | | |
| 3 | <i>Abies sibirica</i> Ledeb. | 21 | 70 | II |
| 4 | <i>Picea obovata</i> Ledeb. | 4 | 90 | I |
| 5 | <i>Pinus sylvestris</i> L. | 138 | 100 | I |
| Сем. <i>Betulaceae</i> S. F. Gray | | | | |
| 6 | <i>Alnus glutinosa</i> (L.) Gaertn. | 1 | 90 | I |
| 7 | <i>Alnus alnobetula</i> (Ehrh.) K.Koch subsp. <i>fruticosa</i> (Rupr.) Raus | 4 | 100 | I |
| 8 | <i>Betula pendula</i> Roth | 160 | 75 | II |
| 9 | <i>Betula pubescens</i> Ehrh. | 30 | 80 | I |
| 10 | <i>Corylus avellana</i> L. | 3 | 100 | I |
| Сем. <i>Caprifoliaceae</i> Juss. | | | | |
| 11 | <i>Lonicera tatarica</i> L. | 50 | 85 | I |
| Сем. <i>Celastraceae</i> R. Br. | | | | |
| 12 | <i>Euonymus verrucosa</i> Scop. | 1 | 80 | I |
| Сем. <i>Elaeagnaceae</i> Juss. | | | | |
| 13 | <i>Elaeagnus angustifolia</i> L. | 1 | 60 | II |
| Сем. <i>Ericaceae</i> Juss. | | | | |
| 14 | <i>Ledum palustre</i> L. | 1 | 60 | II |
| 15 | <i>Vaccinium corymbosum</i> L. | 1 | 65 | II |
| 16 | <i>Vaccinium myrtillus</i> L. | 1 | 52 | II |
| Сем. <i>Fabaceae</i> Lindl. | | | | |
| 17 | <i>Caragana frutex</i> (L.) C. Koch | 2 | 100 | I |
| 18 | <i>Chamaecytisus ruthenicus</i> (Fischer ex Wotowiczak) Klásk. | 4 | 60 | II |
| Сем. <i>Fagaceae</i> Dumort. | | | | |
| 19 | <i>Quercus robur</i> L. | 52 | 72 | II |
| Сем. <i>Rhamnaceae</i> Juss. | | | | |
| 20 | <i>Frangula alnus</i> L. | 1 | 80 | I |
| Сем. <i>Ranunculaceae</i> Juss. | | | | |
| 21 | <i>Atragene speciosa</i> L. | 5 | 100 | I |
| Сем. <i>Rosaceae</i> Juss. | | | | |
| 22 | <i>Amygdalus nana</i> L. | 3 | 80 | I |
| 23 | <i>Cerasus fruticosa</i> Pall. | 4 | 80 | I |
| 24 | <i>Crataegus sanguinea</i> Pall. | 5 | 90 | I |
| 25 | <i>Prunus padus</i> L. | 5 | 95 | I |
| 26 | <i>Rosa acicularis</i> Lindl. | 10 | 90 | I |
| 27 | <i>Rosa majalis</i> Herm. | 9 | 92 | I |

Окончание табл. 2

| № | Латинское название | Количество, шт. | Жизненное состояние, % | Категория состояния вида |
|--|--------------------------------|-----------------|------------------------|--------------------------|
| Сем. <i>Rosaceae</i> Juss. | | | | |
| 28 | <i>Rubus idaeus</i> L. | 850 | 100 | I |
| 29 | <i>Rubus caesius</i> L. | 36 | 100 | I |
| 30 | <i>Sorbus aucuparia</i> L. | 20 | 80 | I |
| 31 | <i>Spiraea crenata</i> L. | 1 | 80 | I |
| Сем. <i>Salicaceae</i> Mirb. | | | | |
| 32 | <i>Populus alba</i> L. | 3 | 80 | I |
| 33 | <i>Populus tremula</i> L. | 5 | 100 | I |
| 34 | <i>Populus nigra</i> L. | 1 | 90 | I |
| 35 | <i>Salix acutifolia</i> Willd. | 5 | 70 | II |
| 36 | <i>Salix alba</i> L. | 20 | 75 | II |
| 37 | <i>Salix caprea</i> L. | 4 | 74 | II |
| 38 | <i>Salix dasyclados</i> Wimm. | 12 | 70 | II |
| 39 | <i>Salix fragilis</i> L. | 21 | 73 | II |
| 40 | <i>Salix pentandra</i> L. | 10 | 70 | II |
| 41 | <i>Salix triandra</i> L. | 11 | 71 | II |
| 42 | <i>Salix viminalis</i> L. | 10 | 70 | II |
| Сем. <i>Sambucaceae</i> Batsch ex Borkh. | | | | |
| 43 | <i>Sambucus racemosa</i> L. | 2 | 100 | I |
| Сем. <i>Sapindaceae</i> Juss. | | | | |
| 44 | <i>Acer platanoides</i> L. | 250 | 75 | II |
| Сем. <i>Thymelaeaceae</i> Juss. | | | | |
| 45 | <i>Daphne mezereum</i> L. | 1 | 80 | I |
| Сем. <i>Tiliaceae</i> Juss. | | | | |
| 46 | <i>Tilia cordata</i> Mill. | 11 | 80 | I |
| Сем. <i>Ulmaceae</i> Mirb. | | | | |
| 47 | <i>Ulmus laevis</i> Pall. | 20 | 72 | II |
| Сем. <i>Viburnaceae</i> Rafin. | | | | |
| 48 | <i>Viburnum opulus</i> L. | 4 | 100 | I |

Атмосферное и почвенное загрязнение влияет на жизненное состояние древесных растений и приводит к поражению листьев некрозами и хлорозом, усыханию ветвей и общей ослабленности всего растительного организма [27–30]. Соседство территории Ботанического сада-института с крупной магистральной артерией города — улицей Менделеева — также оказало влияние на жизненное состояние некоторых видов. Все древесные растения природной флоры на его территории относятся к двум категориям состояния — I и II (см. табл. 2). Отсутствие растений с более сильными повреждениями можно объяснить проведением регулярных рубок ухода, которые систематически выполняются на территории Ботанического сада-института. Вместе с тем в составе древесных насаждений есть единичные очень старые и крупные деревья с сильными повреж-

дениями, как, например, вяз гладкий на участке естественного леса (см. рис. 1). Обрезка или полная вырубка таких деревьев пока вызывает некоторые трудности. Незначительное снижение жизненного состояния отдельных древесных видов (до 60...75 %) вызвано поражением кроны вредителями и болезнями, что периодически наблюдается как на территории Ботанического сада-института, так и в городских насаждениях.

Выводы

Таким образом, проведенные исследования позволяют охарактеризовать состояние древесных растений природной флоры Башкортостана на территории Южно-Уральского ботанического сада-института УФИЦ РАН. Поскольку Ботанический сад-институт находится в урбанизированной среде и непосредственной близости к оживленным автомагистралям, то некоторые экземпляры, особенно старые, имеют повреждения в виде усыхающей и малооблиственной кроны, но в целом жизненное состояние таких растений можно определить как здоровое. Выделение среди древесных видов природной флоры хозяйственно-ценных групп, а также редких и охраняемых растений позволяет расширить тематику экскурсионных мероприятий и повысить уровень эколого-просветительской деятельности Южно-Уральского ботанического сада-института УФИЦ РАН.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Биоразнообразие природных систем и растительные ресурсы России: оценка состояния и мониторинг динамики, проблемы сохранения, воспроизводства, увеличения и рационального использования» в рамках государственного задания ЮУБСИ УФИЦ РАН по теме 122033100041-9.

Список литературы

- [1] Горбунов Ю.Н., Швецов А.Н., Шатко В.Г. Роль ботанических садов России в сохранении генофонда редких и исчезающих растений // Бюллетень Главного ботанического сада, 2015. № 2 (201). С. 94–103.
- [2] Баранова О.Г., Паутова И.А., Цейтин Н.Г. Представленность растений природной флоры Северо-Запада России в коллекции Ботанического сада Петра Великого // Hortus Botanicus, 2018. Т. 13. С. 604–609.
- [3] Лепешкина Л.А., Воронин А.А., Клевцова М.А. Коллекция «Систематикум цветковых растений природной флоры лесостепи» в Воронежском ботаническом саду: оценка состояния и перспективы развития // Труды по интродукции и акклиматизации растений. Ижевск: Изд-во Удмуртского федерального исследовательского центра УрО РАН, 2021. С. 338–342.
- [4] Шпилевая Н.В. Декоративные лекарственные виды растений природной флоры Донбасса коллекции ГУ

- «Донецкий ботанический сад» в ландшафтном озеленении // Труды по интродукции и акклиматизации растений. Ижевск: Изд-во Удмуртского федерального исследовательского центра УрО РАН, 2021. С. 538–542.
- [5] Белоусова Н.Л., Лунина Н.М. Коллекция «Декоративные растения природной флоры Беларуси» в Центральном ботаническом саду НАН Беларуси // Цветоводство: история, теория, практика. Сб. статей IX Междунар. науч. конф., Санкт-Петербург, 07–13 сентября 2019 г. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина), 2019. С. 28–30.
- [6] Шустов М.В., Швецов А.Н., Коновалова Т.Ю., Воронина О.Е., Джанаева В.В. Виды экспозиции дикорастущих полезных растений Главного ботанического сада им. Н.В. Цицина РАН, занесенные в Красную книгу России // Бюллетень Главного ботанического сада, 2020. № 4. С. 3–8.
- [7] Абрамова Л.М., Анищенко И.Е., Вафин Р.В., Голованов Я.М., Жигунов О.Ю., Зарипова А.А., Кашаева Г.Г., Лебедева М.В., Полякова Н.В., Реут А.А., Шигапов З.Х. Растения Южно-Уральского ботанического сада-института УФИЦ РАН / под ред. Л.М. Абрамова. Уфа: Мир печати, 2019. 304 с.
- [8] Полякова Н.В., Путенихин В.П., Вафин Р.В. Сирени в Башкирском Предуралье: интродукция и биологические особенности. Уфа: Гилем, 2010. 170 с.
- [9] Рязанова Н.А., Путенихин В.П. Клены в Башкирском Предуралье: биологические особенности в условиях интродукции. Уфа: Изд-во Академии наук Республики Башкортостан; Гилем, 2012. 224 с.
- [10] Абдуллина Р.Г. Сезонный ритм развития рябин (*Sorbus L.*) в Южно-Уральском ботаническом саду-институте г. Уфы за период 2005–2017 гг. // Известия Уфимского научного центра Российской академии наук, 2018. № 2. С. 44–48.
- [11] Мурзабулатова Ф.К., Полякова Н.В., Никитина Л.С., Путенихин В.П., Шигапов З.Х. Красивоцветущие и декоративно-лиственные кустарники (фрутицетум, сирингарий и некоторые другие коллекционные участки Уфимского ботанического сада). Уфа: Мир печати, 2018. 152 с.
- [12] Мурзабулатова Ф.К., Шигапов З.Х., Полякова Н.В. Начальные этапы онтогенеза представителей рода *Hydrangea L.* в условиях культуры // Онтогенез, 2021. Т. 52. № 2. С. 137–145.
DOI: 10.31857/S047514502102004X
- [13] Мурзабулатова Ф.К., Полякова Н.В., Шигапов З.Х. Древесные медоносы для создания участка длительного цветения в условиях Башкирского Предуралья // Таврический вестник аграрной науки, 2022. № 3(31). С. 137–147.
- [14] Абрамова Л.М., Бидалова Р.А., Вафин Р.В., Шигапов З.Х. Влияние метеоусловий и видовых особенностей на прохождение фенотат клематисов в Башкирском Предуралье // Теоретическая и прикладная экология, 2021. № 3. С. 153–159.
DOI: 10.25750/1995-4301-2021-3-153-159
- [15] The Plant List. URL: <http://www.theplantlist.org/> (дата обращения 28.03.2023).
- [16] 2003* Россия* Красный список особо охраняемых редких и находящихся под угрозой исчезновения животных и растений. 2-й выпуск. Часть 3.1. Семенные растения // Лаборатория Красной книги Всероссийского научно-исследовательского института охраны природы/ под ред. В.Е. Присяжнюка. М., 2004 (2005). 352 с.
- [17] Гроссгейм А.А. Растительные ресурсы Кавказа. М.: Наука, 1953. 539 с.
- [18] Шагапсов С.Х., Надзирова Р.Ю. Хозяйственно-ресурсная структура раритетной фракции флоры Кабардино-Балкарии // Доклады Адыгской (Черкесской) Международной академии наук, 2020. Т. 20. № 1. С. 53–61.
- [19] Алексеев В.А. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев // Лесоведение, 1989. № 4. С. 51–57.
- [20] Потапова И.В., Чепик Ф.А., Васильев С.В. Древесные растения, используемые в народной медицине // Актуальные вопросы лесного хозяйства: Материалы V Междунар. молодежной науч.-практ. конф., Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, Санкт-Петербург, 11–12 ноября 2021 г. Санкт-Петербург: Изд-во Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, 2021. С. 63–65.
- [21] Корчагов С.А., Андронов М.М., Грибов С.Е., Яковлева О.Ю. Обоснование выбора древесных пород при целевом выращивании сырья для целлюлозно-бумажной промышленности // Экология промышленного производства, 2009. № 4. С. 48–51.
- [22] Самсонова И.Д., Нешатаев В.Ю., До Ван Т., Нгуен Тхи З. Эколого-биологический анализ медоносов березняков // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2019. № 229. С. 104–117.
- [23] Самсонова И.Д., Сидаренко П.В. Географические особенности медоносных угодий на землях лесного фонда // Известия Оренбургского государственного аграрного университета, 2021. № 4 (90). С. 99–103.
- [24] Маннапов А.Г., Мустафин Р.Ф., Хисамов Р.Р., Фархутдинов Р.Г., Габидуллина Г.Ф., Султанов И.Ф., Дихин Д.Р. Изучение состояния и кадастровая оценка естественных медоносных ресурсов северной лесостепной зоны Республики Башкортостан // Естественные и технические науки, 2021. № 9 (160). С. 53–58.
DOI: 10.25633/ETN.2021.09.04
- [25] Карташова Н.П., Селиванова А.С., Молодых М.С. Ландшафтные приемы создания городской системы озеленения // Лесотехнический журнал, 2018. Т. 8. № 2 (30). С. 122–131.
- [26] Потапенко И.Л., Летухова В.Ю. Декоративные древесные растения города Керчь и перспективы их использования в озеленении // Экосистемы, 2022. № 31. С. 72–85.
- [27] Dobbertin M. Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress: a review // European J. of Forest Research, 2005, v. 124, no. 4, pp. 319–333.
- [28] Eilmann B., Weber P., Rigling A., Eckstein D. Growth reactions of *Pinus sylvestris L.* and *Quercus pubescens* Willd. to drought years at a xeric site in Valais, Switzerland // Dendrochronologia, 2006, v. 23, pp. 121–132.
- [29] Levanič T., Eggertsson O. Climatic effects on birch (*Betula pubescens* Ehrh.) growth in Fnjos-kadalur valley, northern Iceland // Dendrochronologia, 2008, v. 25, pp. 135–143.
- [30] Rucandio M.I., Petit-Domínguez M.D., Fidalgo-Hijano C., García-Giménez R. Biomonitoring of chemical elements in an urban environment using arboreal and bush plant species // Environmental science and pollution research, 2010, v. 18, no. 1, pp. 51–63.

Сведения об авторах

Полякова Наталья Викторовна [✉] — канд. биол. наук, вед. науч. сотр. лаборатории дендрологии и интродукции древесных растений Южно-Уральского ботанического сада-института УФИЦ РАН, botsad@anrb.ru

Мурзабулатова Фануза Кавиевна — канд. биол. наук, науч. сотр. лаборатории дендрологии и интродукции древесных растений Южно-Уральского ботанического сада-института УФИЦ РАН, murzabulatova@yandex.ru

Рязанова Надежда Александровна — канд. биол. наук, науч. сотр. лаборатории дендрологии и интродукции древесных растений Южно-Уральского ботанического сада-института УФИЦ РАН, nad-ryazanova@mail.ru

Абдуллина Римма Галимзяновна — канд. биол. наук, науч. сотр. лаборатории дендрологии и интродукции древесных растений Южно-Уральского ботанического сада-института УФИЦ РАН, rimmaabdullina@yandex.ru

Билалова Роза Альтафовна — канд. биол. наук, науч. сотр. лаборатории дендрологии и интродукции древесных растений Южно-Уральского ботанического сада-института УФИЦ РАН, proza@mail.ru

Поступила в редакцию 14.04.2023.

Одобрено после рецензирования 25.05.2023.

Принята к публикации 01.12.2023.

LIGNEOUS PLANTS OF BASHKORTOSTAN'S NATURAL FLORA IN COLLECTIONS AND EXPOSITIONS OF SOUTH URAL BOTANICAL GARDEN-INSTITUTE (UFA)

N.V. Polyakova [✉], **F.K. Murzabulatova**, **N.A. Ryazanova**,
R.G. Abdullina, **R.A. Bilalova**

South Ural Botanical Garden-Institute — a separate structural subdivision of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 195, build. 3, Mendeleev st., 450080, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia

botsad@anrb.ru

The analysis results of the dendrological collection of the South Ural Botanical Garden-Institute of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, currently numbering 1935 taxa, are presented. It includes 48 species from 33 genera and 19 families, the most species-rich families of Salicaceae and Rosaceae. It was established that 27 out of 48 species are listed by the IUCN and are under special protection in the territory of other subjects of the Russian Federation, 1 species is listed in the Red Book of Bashkortostan. Economically significant groups of woody plants of the natural flora of Bashkortostan have been identified, among which are medicinal — 46 species, wood-cellulose — 20, melliferous — 14, ornamental — 30, food — 9. All these species belong to categories I and II of the state, i.e. healthy or with slight damage to the stem. All of them are located on the Natural Forest area, in the Arboretum, partly in the collection plots, and also sporadically throughout the territory of the Botanical Garden.

Keywords: natural flora, woody plants, dendrological collection, Republic of Bashkortostan

Suggested citation: Polyakova N.V., Murzabulatova F.K., Ryazanova N.A., Abdullina R.G., Bilalova R.A. *Drevesnye rasteniya prirodnoy flory Bashkortostana v kollektitsiyakh i ekspozitsiyakh Yuzhno-Ural'skogo botanicheskogo sada-instituta (g. Ufa)* [Ligneous plants of Bashkortostan's natural flora in collections and expositions of South Ural Botanical garden-institute (Ufa)]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 2, pp. 105–115. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-105-115

References

- [1] Gorbunov Yu.N., Shvetsov A.N., Shatko V.G. *Rol' botanicheskikh sadov Rossii v sokhraneniі genofonda redkikh i ischezayushchikh rasteniy* [The role of Russian botanical gardens in the conservation of the gene pool of rare and endangered plants]. *Byulleten' Glavnogo botanicheskogo sada* [Bulletin of the Main Botanical Garden], 2015, no. 2 (201), pp. 94–103.
- [2] Baranova O.G., Pautova I.A., Tseytin N.G. *Predstavlennost' rasteniy prirodnoy flory Severo-Zapada Rossii v kollektitsii Botanicheskogo sada Petra Velikogo* [Representation of plants of the natural flora of the North-West of Russia in the collection of the Botanical Garden of Peter the Great]. *Hortus Botanicus*, 2018, t. 13. pp. 604–609.
- [3] Lepeshkina L.A., Voronin A.A., Klevtsova M.A. *Kollektsiya «Sistematikum tsvetkovykh rasteniy prirodnoy flory lesostepi» v Voronezhskom botanicheskom sadu: otsenka sostoyaniya i perspektivy razvitiya* [Collection «Systematicum of flowering

- plants of the natural flora of the forest-steppe» in the Voronezh Botanical Garden: assessment of the state and development prospects]. Trudy po introduktsii i akklimatizatsii rasteniy [Proceedings on the introduction and acclimatization of plants]. Izhevsk: Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2021, pp. 338–342.
- [4] Shpilevaya N.V. *Dekorativnye lekarstvennye vidy rasteniy prirodnoy flory Donbassa kolleksii GU «Donetskii botanicheskii sad» v landshaftnom ozelenenii* [Ornamental medicinal plant species of the natural flora of Donbass from the collection of the State Institution «Donetsk Botanical Garden» in landscape gardening]. Trudy po introduktsii i akklimatizatsii rasteniy [Proceedings on the introduction and acclimatization of plants]. Izhevsk: Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2021, pp. 538–542.
- [5] Belousova N.L., Lunina N.M. *Kollektsiya «Dekorativnye rasteniya prirodnoy flory Belarusi» v Tsentral'nom botanicheskom sadu NAN Belarusi* [Collection «Ornamental plants of the natural flora of Belarus» in the Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus]. Tsvetovodstvo: istoriya, teoriya, praktika. Sbornik statey IX Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii [Floriculture: history, theory, practice. Collection of articles of the IX International Scientific Conference], 2019, pp. 28–30.
- [6] Shustov M.V., Shvetsov A.N., Konovalova T.Yu., Voronina O.E., Dzhanayeva V.V. *Vidy ekspozitsii dikorastushchikh poleznykh rasteniy Glavnogo botanicheskogo sada im. N.V. Tsitsina RAN, zanesennye v Krasnyy knigu Rossii* [Types of exposition of wild useful plants of the Main Botanical Garden. N.V. Tsitsina RAS, listed in the Red Book of Russia]. Byulleten' Glavnogo botanicheskogo sada [Bulletin of the Main Botanical Garden], 2020, no. 4, pp. 3–8.
- [7] Abramova L.M., Anishchenko I.E., Vafin R.V., Golovanov Ya.M., Zhigunov O.Yu., Zaripova A.A., Kashaeva G.G., Lebedeva M.V., Polyakova N.V., Reut A.A., Shigapov Z.Kh. *Rasteniya Yuzhno-Ural'skogo botanicheskogo sada-instituta UFITs RAN* [Plants of the South Ural Botanical Garden-Institute of the Ural Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences]. Ed. L.M. Abramov. Ufa: World of Printing, 2019, 304 p.
- [8] Polyakova N.V., Putenikhin V.P., Vafin R.V. *Sireni v Bashkirskom Predural'e: introduktsiya i biologicheskie osobennosti* [Lilacs in the Bashkir Cis-Urals: introduction and biological features]. Ufa: Gilem, 2010, 170 p.
- [9] Ryazanova N.A., Putenikhin V.P. *Kleny v Bashkirskom Predural'e: biologicheskie osobennosti v usloviyakh introduktsii* [Maples in the Bashkir Cis-Urals: biological features under the conditions of introduction]. Ufa: Gilem, 2012, 224 p.
- [10] Abdullina R.G. *Sezonnyy ritm razvitiya ryabin (Sorbus L.) v Yuzhno-Ural'skom botanicheskom sadu-institute g. Ufy za period 2005–2017 gg.* [Seasonal rhythm of development of mountain ash (*Sorbus L.*) in the South Ural Botanical Garden-Institute in Ufa for the period 2005–2017]. Izvestiya Ufimskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk [Proceedings of the Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2018, no. 2, pp. 44–48.
- [11] Murzabulatova F.K., Polyakova N.V., Nikitina L.S., Putenikhin V.P., Shigapov Z.Kh. *Krasivotsvetushchie i dekorativno-listvennye kustarniki (frutitsetum, siringariy i nekotorye drugie kolleksionnye uchastki Ufimskogo botanicheskogo sada)* [Beautifully flowering and ornamental deciduous shrubs (fruticetum, syringarium and some other collection sites of the Ufa Botanical Garden)]. Ufa: World of Printing, 2018, 152 p.
- [12] Murzabulatova F.K., Shigapov Z.Kh., Polyakova N.V. *Nachal'nye etapy ontogeneza predstaviteley roda Hydrangea L. v usloviyakh kul'tury* [Initial stages of ontogenesis of representatives of the genus *Hydrangea L.* in culture]. Ontogenez [Ontogenesis], 2021, t. 52, no. 2, pp. 137–145.
- [13] Murzabulatova F.K., Polyakova N.V., Shigapov Z.Kh. *Drevesnye medonosy dlya sozdaniya uchastka dlitel'nogo tsveteniya v usloviyakh Bashkirskogo Predural'ya* [Woody honey plants for creating a long-term flowering site in the conditions of the Bashkir Cis-Urals]. Tavricheskii vestnik agrarnoy nauki [Taurida Herald of the Agrarian Sciences], 2021, no. 2 (26), pp. 74–88.
- [14] Abramova L.M., Bilalova R.A., Vafin R.V., Shigapov Z.Kh. *Vliyanie meteousloviy i vidovykh osobennostey na prokhozhdenie fenodat klematisov v Bashkirskom Predural'e* [Influence of weather conditions and species features on the passage of clematis phenodes in the Bashkir Cis-Urals]. Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya [Theoretical and applied ecology], 2021, no. 3, pp. 153–159.
- [15] The Plant List. Available at: <http://www.theplantlist.org/> (accessed 28.03.2023).
- [16] 2003* Rossiya* Krasnyy spisok osobo okhranyaemykh redkikh i nakhodyashchikhsya pod ugrozoy ischeznoeniya zhivotnykh i rasteniy. 2-y vypusk. Chast' 3.1. Semennye rasteniya [2003* Russia* Red List of Specially Protected Rare and Endangered Animals and Plants. 2nd issue. Part 3.1. seed plants]. Laboratoriya Krasnoy knigi Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta okhrany prirody [Laboratory of the Red Data Book of the All-Russian Scientific Research Institute for Nature Conservation]. Ed. V.E. Prisyazhnyuk. Moscow, 2004 (2005), 352 p.
- [17] Grossgeym A.A. *Rastitel'nye resursy Kavkaza* [Plant resources of the Caucasus]. Moscow: Nauka, 1953, 539 p.
- [18] Shkhagapov S.Kh., Nadzirova R.Yu. *Khozyaystvenno-resursnaya struktura raritetnoy fraktsii flory Kabardino-Balkarii* [Economic and resource structure of the rare fraction of the flora of Kabardino-Balkaria]. Doklady AdygsКОЙ (Cherkesskoy) Mezhdunarodnoy akademii nauk [Reports of the Adyghe (Circassian) International Academy of Sciences], 2020, t. 20, no. 1, pp. 53–61.
- [19] Alekseev V.A. *Diagnostika zhiznennogo sostoyaniya derev'ev i drevostoev* [Diagnostics of the vital state of trees and forest stands]. Lesovedenie [Forest science], 1989, no. 4, pp. 51–57.
- [20] Potapova I.V., Chepik F.A., Vasil'ev S.V. *Drevesnye rasteniya, ispol'zuemye v narodnoy meditsine* [Woody plants used in folk medicine]. Aktual'nye voprosy lesnogo khozyaystva: materialy V mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy lesotekhnicheskii universitet imeni S.M. Kirova [Topical issues of forestry. materials of the V international youth scientific-practical conference. St. Petersburg State Forest Engineering University named after S.M. Kirov]. Sankt-Peterburg, 11–12 noyabrya 2021 g. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy lesotekhnicheskii universitet imeni S.M. Kirova, 2021, pp. 63–65.
- [21] Korchagov S.A., Andronova M.M., Gribov S.E., Yakovleva O.Yu. *Obosnovanie vybora drevesnykh porod pri tselvom vyrashchivanii syr'ya dlya tsellyulozno-bumazhnoy promyshlennosti* [Justification of the choice of tree species for the targeted cultivation of raw materials for the pulp and paper industry]. Ekologiya promyshlennogo proizvodstva [Ecology of industrial production], 2009, no. 4, pp. 48–51.

- [22] Samsonova I.D., Neshataev V.Yu., Do Van T., Nguen Tkhi Z. *Ekologo-biologicheskiy analiz medonosov bereznyakov* [Ecological and biological analysis of birch honey plants]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy], 2019, no. 229, pp. 104–117.
- [23] Samsonova I.D., Sidarenko P.V. Geograficheskie osobennosti medonosnykh ugodiy na zemlyakh lesnogo fonda [Geographical features of honey lands on the lands of the forest fund]. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Proceedings of the Orenburg State Agrarian University], 2021, no. 4 (90), pp. 99–103.
- [24] Mannapov A.G., Mustafin R.F., Khisamov R.R., Farkhutdinov R.G., Gabidullina G.F., Sultanov I.F., Dikhin D.R. *Izucheniye sostoyaniya i kadaastrovaya otsenka estestvennykh medonosnykh resursov severnoy lesostepnoy zony Respubliki Bashkortostan* [Study of the state and cadastral assessment of natural honey plants resources of the northern forest-steppe zone of the Republic of Bashkortostan]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Natural and technical sciences], 2021, no. 9 (160), pp. 53–58.
- [25] Kartashova N.P., Selivanova A.S., Molodykh M.S. *Landshaftnyye priemy sozdaniya gorodskoy sistemy ozeleneniya* [Landscape techniques for creating an urban gardening system]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry magazine], 2018, t. 8, no. 2 (30), pp. 122–131.
- [26] Potapenko I.L., Letukhova V.Yu. *Dekorativnye drevesnye rasteniya goroda Kerch' i perspektivy ikh ispol'zovaniya v ozelenenii* [Ornamental woody plants of the city of Kerch and the prospects for their use in landscaping]. *Ekosistemy* [Ecosystems], 2022, no. 31, pp. 72–85.
- [27] Dobbertin M. Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress: a review. *European J. of Forest Research*, 2005, v. 124, no. 4, pp. 319–333.
- [28] Eilmann B., Weber P., Rigling A., Eckstein D. Growth reactions of *Pinus sylvestris* L. and *Quercus pubescens* Willd. to drought years at a xeric site in Valais, Switzerland. *Dendrochronologia*, 2006, v. 23, pp. 121–132.
- [29] Levanič T., Eggertsson O. Climatic effects on birch (*Betula pubescens* Ehrh.) growth in Fnjos-kadalur valley, northern Iceland. *Dendrochronologia*, 2008, v. 25, pp. 135–143.
- [30] Rucandio M.I., Petit-Domínguez M.D., Fidalgo-Hijano C., García-Giménez R. Biomonitoring of chemical elements in an urban environment using arboreal and bush plant species. *Environmental science and pollution research*, 2010, v. 18, no. 1, pp. 51–63.

The work was carried out within the framework of the RAS Presidium Basic Research Programme «Biodiversity of natural systems and plant resources of Russia: state assessment and monitoring of dynamics, problems of conservation, reproduction, increase and rational use» within the framework of the state assignment of the South UBSSI UFIC RAS on the theme 122033100041-9.

Authors' information

Polyakova Natal'ya Viktorovna — Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, Laboratory of Dendrology and Introduction of Woody Plants, South Ural Botanical Garden-Institute, UFRC RAS, botsad@anrb.ru

Murzabulatova Fanuza Kavievna — Cand. Sci. (Biology), Researcher, Laboratory of Dendrology and Introduction of Woody Plants, South Ural Botanical Garden-Institute, Ural Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, murzabulatova@yandex.ru

Ryazanova Nadezhda Aleksandrovna — Cand. Sci. (Biology), Researcher, Laboratory of Dendrology and Introduction of Woody Plants, South Ural Botanical Garden-Institute, Ural Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, nad-ryazanova@mail.ru

Abdullina Rimma Galimzyanovna — Cand. Sci. (Biology), Researcher, Laboratory of Dendrology and Introduction of Woody Plants, South Ural Botanical Garden-Institute, Ural Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, rimmaabdullina@yandex.ru

Bilalova Roza Al'tafovna — Cand. Sci. (Biology), Researcher, Laboratory of Dendrology and Introduction of Woody Plants, South Ural Botanical Garden-Institute, Ural Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, nroza@mail.ru

Received 14.04.2023.

Approved after review 25.05.2023.

Accepted for publication 01.12.2023.

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 РЕОЛОГИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ИЗМЕЛЬЧЕННОЙ ДРЕВЕСИНЫ СОСНЫ ПРИ ОДНООСНОМ ПРЕССОВАНИИ

М.В. Михеев^{2✉}, А.В. Комина¹, Г.А. Горбачева¹, А.А. Калинина¹,
А.В. Болоцкая², В.Г. Санаев¹, А.М. Столин²

¹ФГБОУ 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

²ФГБУН Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения имени А.Г. Мерджанова Российской академии наук (ИСМАН), Россия, 142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 8

mmixeev00@mail.ru

Представлены материалы исследования реологических аспектов одноосного прессования измельченной древесины сосны различного фракционного состава. Изучена кинетика деформирования измельченной древесины сосны в режиме постоянной скорости движения плунжера пресса с помощью реологического подхода. Построены реологические кривые напряжение — деформация для различных фракций ($d < 1$ мм; $1 < d < 2$; $2 < d < 3$; $d > 5$). Получены компрессионные кривые зависимости плотности прессовок от давления. Показано, что фракции размером частиц менее 1 мм обладают наилучшими параметрами прессуемости и достигают более высокой плотности при меньших значениях давления ($\rho_{\text{заг}} = 1,03$ г/см³ при $P = 180$ МПа). Другие изученные фракции имели приблизительно одинаковую прессуемость и плотность $\rho_{\text{заг}}$ в диапазоне 0,85...0,90 г/см³ при $P = 140...160$ МПа. Дальнейшее увеличение давления прессования не приводило к увеличению плотности из-за упругого расширения после снятия нагрузки. Предложены установка и способ оценки прочности прессовок при свободном падении. Определена наибольшая прочность прессовок при падении фракции размером более 5 мм. Полученные результаты можно применять для оптимизации процесса прессования измельченной древесины и разработки более эффективных методов использования древесных ресурсов.

Ключевые слова: реология, прессование, измельченная древесина сосны, отходы лесозаготовительного и деревообрабатывающего производств

Ссылка для цитирования: Михеев М.В., Комина А.В., Горбачева Г.А., Калинина А.А., Болоцкая А.В., Санаев В.Г., Столин А.М. Исследование реологического поведения измельченной древесины сосны при одноосном прессовании // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 2. С. 116–126.
DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-116-126

Обеспечение комплексного использования лесного сырья, включая низкокачественную древесину, относится к основным направлениям развития лесной промышленности и отражено в Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года [1]. Переориентация отрасли с экспорта необработанных лесоматериалов на производство продукции с высокой добавленной стоимостью предполагает совершенствование имеющихся и разработку новых технологий переработки добываемой древесины [2–11].

В подавляющем большинстве случаев ветви и верхушки деревьев остаются на месте вырубki, что приводит к потере сырья, которое могло бы быть использовано в деревоперерабатывающей промышленности. Такая практика приводит к загрязнению лесных экосистем и увеличению риска возникновения пожаров в теплый сезон года [12, 13]. На предприятиях, специализирующихся на производстве пилопродукции, такие отходы про-

изводства, как опилки, щепа, стружка, обалол не применяются в должной мере [14–16]. При этом они являются ценным сырьем, которое можно использовать для производства новых материалов и в других целях [17–23].

При распиловке бревен и производстве пиломатериалов образуются отходы различных размеров и форм. Основной составляющей этих отходов является измельченная древесина, поскольку размер частиц, конфигурация и способ производства могут изменяться [24]. Древесные отходы, включая отсев и мелкую фракцию щепы, направляются на утилизацию, используемую для производства пара и энергии, либо складываются в кучи и вывозятся на свалку. Доля отсева щепы может составлять до 8 % общего объема измельчаемой древесины.

Одним из подходов решения проблемы использования неликвидной измельченной древесины является ее переработка и последующее использование в лесопромышленном производстве и бытовом применении. Примером реализации данного подхода

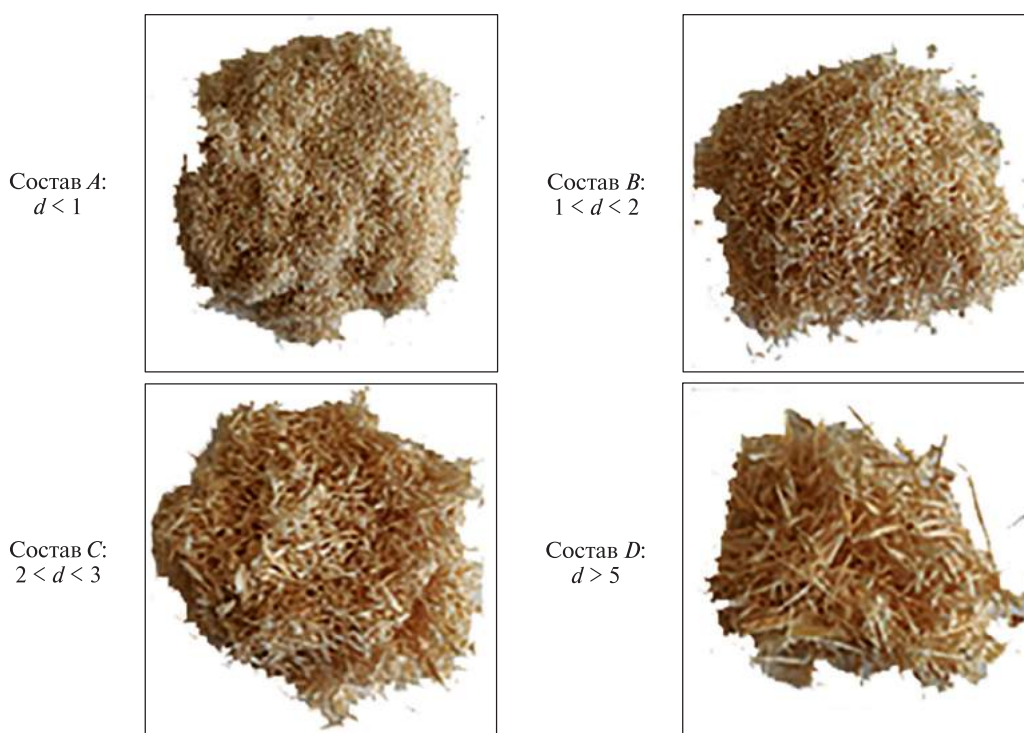


Рис. 1. Исследуемые фракционные составы измельченной древесины сосны, d — размер частиц, мм
Fig. 1. Investigated fractional compositions of disintegrated pine wood, d — particle size, mm

является измельчение неликвидной древесины с дальнейшим прессованием в виде топливных брикетов [25–29]. Для развития теории компактирования важно учитывать зависимость деформационных свойств конгломерата от его плотности. Иными словами, для эффективного использования отходов лесопромышленного производства важно исследовать реологическое поведение измельченной древесины при переработке сырья.

Изучение реологического поведения измельченной древесины является важным аспектом при рассмотрении технологии ее переработки и использования [30–33]. Реология относится к изучению текучих свойств материалов при воздействии на них механических сил и деформаций. Измельченная древесина представляет собой композитный материал, состоящий из различных частиц разных размеров и форм. Реологические свойства определяются взаимодействием между частицами, их концентрацией и структурой. Важными параметрами, характеризующими реологическое поведение измельченной древесины, являются прессуемость, вязкость, пластичность, упругость и течение материала при различных условиях.

Изучение реологии измельченной древесины при одноосном прессовании перспективно как в фундаментальном аспекте исследования сыпучих материалов, так и в прикладном значении, например для технологии производства брикетов [34–37] или строительных материалов.

При этом процессе материал подвергается давлению в одном направлении, что приводит к его компактированию и формированию заготовок определенной формы и размера [38, 39]. Реологические характеристики материала влияют на его способность поддаваться прессованию, формированию и прочности полученных брикетов.

Более глубокое изучение реологии измельченной древесины позволяет оптимизировать параметры процесса прессования, выбрать оптимальные условия и технологии переработки отходов лесозаготовки. Такие исследования способствуют повышению эффективности использования неликвидной древесины и снижению негативного влияния на окружающую среду.

Цель работы

Цель работы — изучить реологическое поведение измельченной древесины при одноосном прессовании, определить оптимальные параметры прессования, а также изучить влияние фракционного состава на прессуемость и прочность полученных заготовок.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования была выбрана измельченная из отходов лесозаготовительного производства древесина сосны, четырех фракционных составов ($d < 1$ мм; $1 < d < 2$; $2 < d < 3$; $d > 5$) камерной сушки (рис. 1).

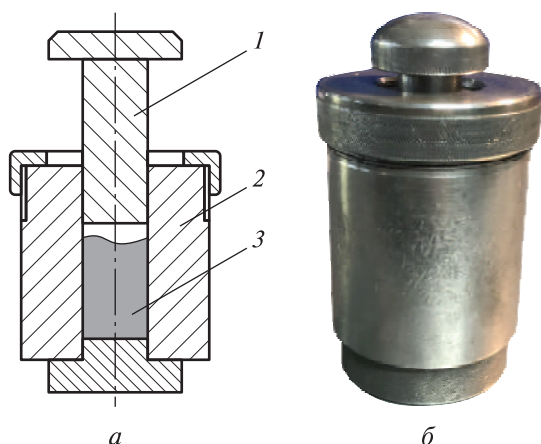


Рис. 2. Схема (а) и внешний вид (б) металлической пресс-формы: 1 — шток; 2 — пресс-форма; 3 — засыпка исследуемого состава

Fig. 2. Scheme (a) and appearance (b) of the metal mould: 1 — stem; 2 — mould; 3 — backfill of the investigated composition

Перед операцией взвешивания измельченную древесину поочередно засыпали в металлическую пресс-форму (рис. 2) до краев, после чего высыпали и взвешивали на электронных весах CAS MWP-300, с точностью измерения до 0,1 %. Диаметр рабочего объема пресс-формы составлял 25 мм.

Расчет насыпной плотности выполнен по формуле

$$\rho_{\text{нас}} = \frac{m}{Sh}, \quad (1)$$

где m — масса насыпки, г;

S — площадь сечения загрузочной камеры, см²;

$h_{\text{нс}}$ — высота насыпного слоя, см.

$$\rho_{\text{п}} = \frac{m_{\text{п}}}{\pi r^2 h_{\text{п}}}, \quad (2)$$

где $m_{\text{п}}$ — масса прессовки;

r^2 — радиус прессовки, см;

$h_{\text{п}}$ — высота прессовки, см.

Относительная плотность прессовки определялась по формуле

$$\rho_{\text{отн}} = \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{д.в}}}, \quad (3)$$

где $\rho_{\text{д.в}}$ — плотность древесинного вещества, равная 1,53 г/см³.

Деформирование исследуемых составов проведено на универсальной испытательной машине «INSTRON 3369» в режиме постоянной скорости 5 мм/с. Обеспечиваемая точность измерения составляла 1 %. Весь экспериментальный ряд выполнен в комнатных условиях. Подготовленная металлическая пресс-форма (см. рис. 2) с исследуемым составом была установлена под плунжер испытательной машины. На плунжер подана нагрузка, под действием которой шток де-

формировал объем засыпки, при этом происходило уплотнение смеси до максимальной нагрузки, по достижении которой нагрузку снимали, а прессовку извлекали. Используя программное обеспечение испытательной машины «INSTRON 3369», были построены реологические кривые зависимости между напряжениями и деформациями (характерный вид кривой представлен на рис. 3), по которым можно судить о реологических свойствах исследуемого состава и оптимальных условиях прессуемости.

Определение зависимости плотности заготовок от давления прессования было проведено на универсальной машине сжатия. Диапазон прикладываемого давления изменяли от 20 до 200 МПа с шагом 20 МПа. Пресс-форма со смесью была установлена под плунжер машины сжатия, к которому прикладывали постоянное давление. После уплотнения и пребывания прессовки под постоянным давлением в течение 30 с прессовку извлекали, затем измеряли ее массу и высоту, рассчитывали плотность при каждом приложенном давлении.

Влияние фракционного состава измельченной древесины сосны на прочность прессовок, полученных без использования пластификаторов, изучали с помощью разработанной установки (рис. 4).

В качестве критерия прочности применяли сопротивление разрушению при свободном падении с высоты 2 м. Для этого на платформу установили прессовку, затем выдергивали веревкой стопорный стержень, удерживающий платформу и образец под действием силы тяжести, падал на стальную плиту, всегда в одно и то же место. Эксперименты проводились с образцами, полученными при низких значениях давления прессования — от 20 до 60 МПа, поскольку более спрессованные образцы менее подвержены разрушению в данных условиях. После каждого падения фиксировалось изменение массы прессовки, критическим показателем служила потеря массы прессовки более чем на 20 %.

Результаты и обсуждение

Нами установлены зависимости приложенного давления и плотности прессовок. На этом основании выполнена оценка уплотняемости сыпучих материалов, которая позволяет, в дальнейшем, выбрать необходимое давление, обеспечивающее заданное значение плотности (рис. 5).

Первая стадия на реологической кривой характеризуется линейным ростом напряжений при увеличении деформации. Деформирование объема материала идет в результате перемещения частиц одной относительно другой, т. е. происходит заполнение пустот.

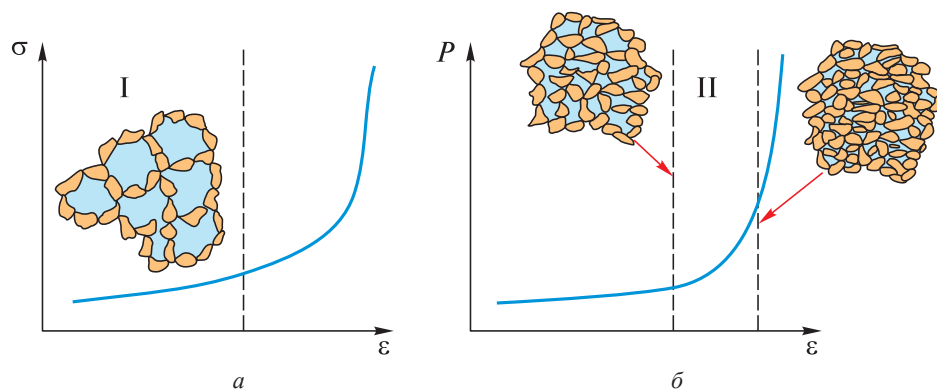


Рис. 3. Характерный вид реологической кривой давление — деформация: *a* — первая стадия (I) — слабый линейный рост напряжения при увеличении деформации; *б* — вторая стадия (II) — интенсивный нелинейный рост напряжений при незначительном увеличении деформации

Fig. 3. Characteristic view of pressure-strain rheological curve: *a* — first stage (I) — weak linear stress growth with strain increase; *б* — second stage (II) — intensive non-linear stress growth with insignificant strain increase

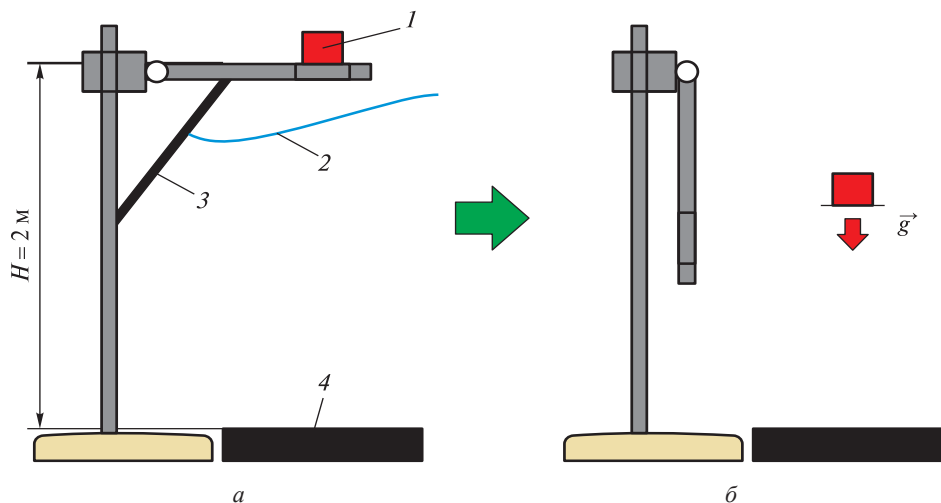


Рис. 4. Схема установки свободного падения: *a* — установка в сборе: 1 — образец; 2 — веревка; 3 — стопорный стержень; 4 — стальная плита; *б* — проведение эксперимента

Fig. 4. Scheme of the free fall installation: *a* — complete installation: 1 — specimen; 2 — rope; 3 — locking rod; 4 — steel plate; *б* — carrying out the experiment

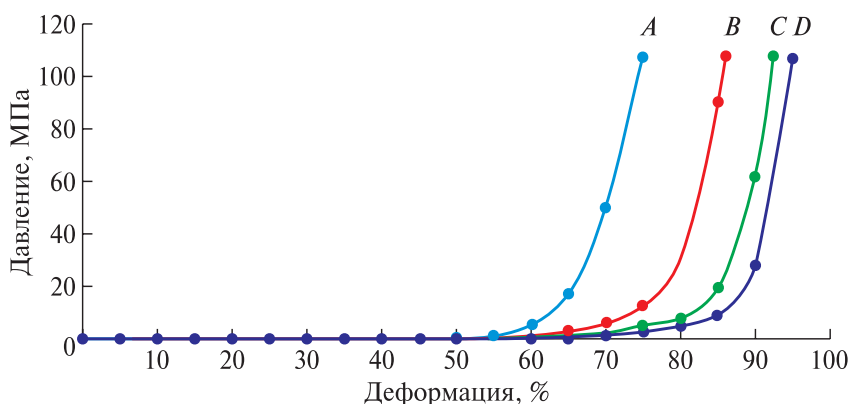


Рис. 5. Реологические кривые для различного фракционного состава измельченной древесины сосны: *A* — $d < 1$; *B* — $1 < d < 2$; *C* — $2 < d < 3$; *D* — $d > 5$

Fig. 5. Rheological curves for different fractional composition of disintegrated pine wood: *A* — $d < 1$; *B* — $1 < d < 2$; *C* — $2 < d < 3$; *D* — $d > 5$

Исходные параметры насыпки (сосна) и полученные значения плотности прессовки
Initial bulk parameters (pine) and obtained values of press density

| Состав | Масса, г | Высота, см | Высота прессовки, мм | Плотность насыпки $\rho_{нас}$, г/см ³ | Плотность прессовки $\rho_{пресс}$, г/см ³ | Относительная плотность $\rho_{отн}$ |
|----------------|----------|------------|----------------------|--|--|--------------------------------------|
| $d < 1$ мм | 3,122 | 4,9 | 0,6 | 0,131 | 1,060 | 0,693 |
| $1 < d < 2$ мм | 3,195 | 5,3 | 0,7 | 0,123 | 0,930 | 0,608 |
| $2 < d < 3$ мм | 3,382 | 5,7 | 0,8 | 0,121 | 0,862 | 0,563 |
| $d > 5$ мм | 3,358 | 6,7 | 0,8 | 0,103 | 0,855 | 0,559 |

Вторая стадия на реологической кривой соответствует очень крутому нелинейному подъему напряжения при незначительном увеличении деформации. На этой стадии перемещение частиц происходит вследствие аккомодации (приспособления) их между собой и частично благодаря деформации объема частиц. Данная стадия требует больших усилий для дальнейшего деформирования материала. Именно она представляет наибольший технологический интерес, поскольку на этой стадии в материале накапливается определенная пластическая деформация, обеспечивающая прочность.

Для третьей стадии при значительном росте давления прессования деформация практически не увеличивается, так как плотность прессовки равна или приблизительно равна плотности компакта (плотности древесинного вещества) (таблица).

Для более подробного рассмотрения процесса прессования на второй стадии реологической кривой были построены зависимости плотности прессовки от давления (компрессионные кривые), иными словами, для интервала давления от 20 МПа до 200 МПа были получены значения плотности прессовок. При достижении предельной плотности (высота прессовки не уменьшается, деформация не происходит) переходили на следующий состав. В результате экспериментов получали компрессионные кривые — графики зависимости плотности прессовки от прикладываемого давления (рис. 6).

Установлено, что наилучшими показателями прессуемости (максимальная плотность $\rho_{зар} = 1,03$ г/см³ при $P = 180$ МПа) обладает фракция $d < 1$ мм. Другие изучаемые фракционные составы $1 < d < 2$ мм; $2 < d < 3$ мм; $d > 5$ мм обладают приблизительно одинаковыми показателями прессуемости ($\rho_{зар} = 0,90$ г/см³ при $P = 160$ МПа; $\rho_{зар} = 0,88$ г/см³ при $P = 140$ МПа; $\rho_{зар} = 0,85$ г/см³ при $P = 140$ МПа соответственно). Связано это с тем, что более мелкие частицы имеют большую поверхность контакта между собой, что способствует лучшей сцепке и формированию более плотной структуры прессовки. В результате, при одном и том же давлении прессования, фракция

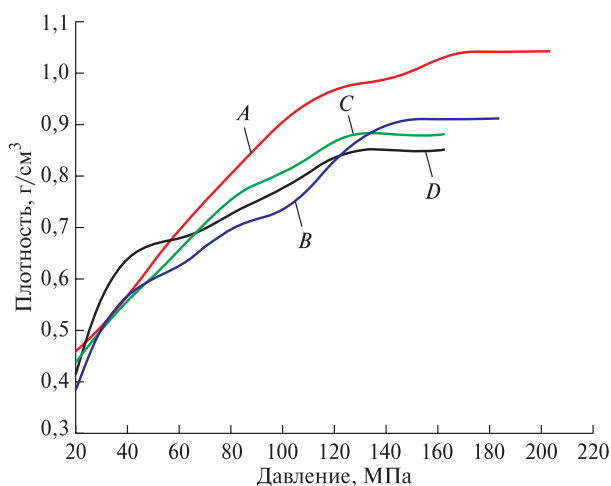


Рис. 6. Компрессионные кривые плотность — давление для различного фракционного состава измельченной древесины сосны: А — $d < 1$; В — $1 < d < 2$; С — $2 < d < 3$; D — $d > 5$

Fig. 6. Compression density-pressure curves for different fractional composition of disintegrated pine wood: А — $d < 1$; В — $1 < d < 2$; С — $2 < d < 3$; D — $d > 5$

с размером частиц менее 1 мм достигает более высокой плотности.

Дальнейшее увеличение давления прессования свыше определенного уровня не приводит к увеличению плотности прессовки. Это может быть связано с явлением упругого расширения после снятия нагрузки. Когда давление снимается, прессовка может немного восстанавливать свою первоначальную форму и увеличивает объем, что ограничивает возможность повышения плотности.

Изучение влияния фракционного состава измельченной древесины сосны на прочность проводилось на заготовках, спрессованных в низком диапазоне давления прессования (20, 40, 60 МПа). Использование прессовок, полученных при больших давлениях, не позволило отследить влияние именно фракционного состава при данном методе испытаний ввиду их высокой прочности. Результаты испытаний представлены на рис. 7.

При свободном падении с высоты 2 м все заготовки, спрессованные под давлением 20 МПа (см. рис. 7, а) из фракций $d < 1$, $1 < d < 2$ и $2 < d < 3$ мм потеряли более 20 % своей массы уже после

первого падения. Прессовка из самой крупной фракции $d > 5$ мм разрушилась после четырех падений.

Результаты испытаний прессовок, полученных под давлением 40 МПа (см. рис. 7, б), коррелируют с прошлыми показателями. Наибольшей сопротивляемостью разрушению при свободном падении обладали прессовки из крупной фракции $d > 5$ мм, критическая потеря массы произошла после 14 падений. Другие прессовки из фракций $d < 1$, $1 < d < 2$ и $2 < d < 3$ мм разрушились после 4, 3 и 5 падений соответственно.

При испытаниях прессовок, полученных под давлением 60 МПа (см. рис. 7, в), такую же стойкость к разрушению при свободном падении показали прессовки из фракции $d > 5$ мм, критическое разрушение которых наступило после 20-го падения. Другие прессовки из фракций $d < 1$, $1 < d < 2$ и $2 < d < 3$ мм разрушились после 14, 12 и 7 падений соответственно.

Повышенная прочность фракции измельченной древесины с размером частиц более 5 мм может быть связана с несколькими факторами. Во-первых, крупные частицы обладают более высокой начальной плотностью по сравнению с мелкими частицами, что может способствовать усилению внутренних связей и структуры прессовки. Более высокая плотность может привести к увеличению сопротивления при воздействии механических сил, что способствует повышению прочности. Во-вторых, фракция с более крупными частицами может обеспечить большую поверхность контакта между частицами при формировании прессовки. Это может способствовать лучшей сцепке между частицами и повышению механической прочности прессовки. Совокупность данных факторов приводит к тому, что фракция с более крупными частицами может образовать более прочную и устойчивую структуру внутри прессовки. Это способствует лучшему распределению напряжений и уменьшению вероятности разрушения при воздействии внешних сил.

Выводы

Полученные результаты подчеркивают значимость фракционного состава, давления прессования и прочности прессовок при оптимизации процесса переработки древесного материала.

Наилучшие результаты прессуемости (максимальная плотность $\rho_{\text{заг}} = 1,03$ г/см³ при $P = 180$ МПа) были достигнуты при использовании фракции с размером частиц $d < 1$ мм. Остальные исследуемые фракции с размерами частиц от 1 до 5 мм демонстрируют примерно одинаковую прессуемость ($\rho_{\text{заг}} = 0,90$ г/см³ при $P = 160$ МПа; $\rho_{\text{заг}} = 0,88$ г/см³ при $P = 140$ МПа; $\rho_{\text{заг}} = 0,85$ г/см³ при $P = 140$ МПа соответственно).

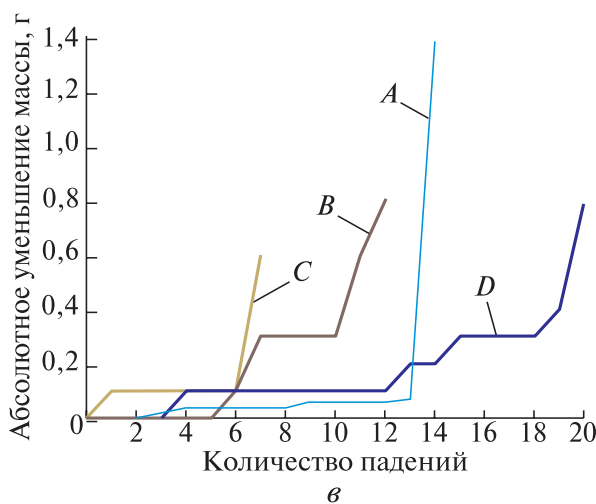
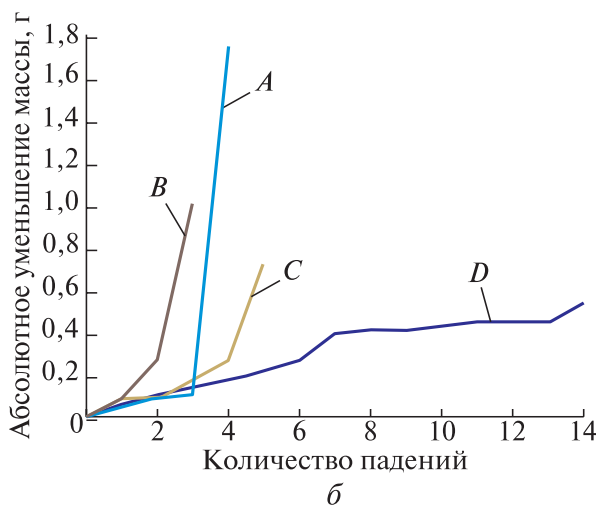
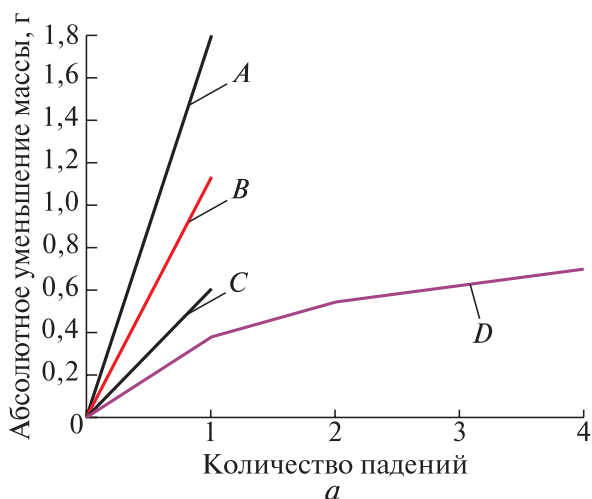


Рис. 7. Абсолютное уменьшение массы при свободном падении образцов исследуемых фракционных составов измельченной древесины сосны (A — $d < 1$; B — $1 < d < 2$; C — $2 < d < 3$; D — $d > 5$), спрессованных под давлением: а — 20 МПа; б — 40 МПа; в — 60 МПа

Fig. 7. Absolute mass reduction at free settling of investigated fractional compositions samples of disintegrated pine wood (A — $d < 1$; B — $1 < d < 2$; C — $2 < d < 3$; D — $d > 5$) compressed under pressure: а — 20 МПа; б — 40 МПа; в — 60 МПа

Дальнейшее повышение давления не приводит к увеличению плотности прессовок.

Разработанная и примененная методика оценки прочности прессовок путем измерения абсолютной потери массы при их свободном падении с высоты 2 м показала, что прессовки с фракцией размером частиц $d > 5$ мм обладают наибольшей прочностью при падении, что позволяет получить фундаментальное представление о влиянии размера частиц измельченной древесины на прочностные характеристики заготовок.

Для дальнейшего развития этого исследования возможны несколько перспективных направлений: 1) углубленный анализ механизмов деформации и дробления измельченной древесины при прессовании для лучшего понимания внутренних процессов и оптимизации структуры получаемых материалов; 2) изучение влияния различных параметров процесса — температуры, влажности, скорости прессования и формы плунжера, на реологические свойства и качество конечной продукции, в целях оптимизации условий прессования для достижения наилучших результатов; 3) сравнительный анализ реологического поведения измельченной древесины различных древесных пород, для дальнейшего выявления особенностей их поведения и определения наиболее подходящих видов для конкретного применения; 4) исследование перспективности использования древесины в производстве композитных материалов или топливных брикетов для развития устойчивых и экологически эффективных методов переработки древесных ресурсов.


Работа выполнена по госзаданию в рамках договора о сотрудничестве между ФГБУН «Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения имени А.Г. Мерджанова Российской академии наук» (ИСМАН) и ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал). Для работы были использованы оборудование и методики лаборатории № 7 «Пластического деформирования материалов» (ИСМАН) и Центра коллективного пользования научным оборудованием «Центр физико-механических испытаний древесины» (ЦКП ЦФМИД) МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал).

Список литературы

- [1] Распоряжение Правительства Российской Федерации от 11 февраля 2021 г. № 312-р (об утверждении Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года). URL: <http://static.government.ru/media/files/pFdqtWFH8y9SfQjDE0Xnwd8eXWoJMYB.pdf> (дата обращения 20.10.2023).
- [2] Власов Ю.Н. Научные основы совершенствования технологии брикетирования отходов лесопереработки: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. Архангельск, 2021. 261 с.
- [3] Трофимова Н.В., Сазыкина М.Ю., Мамлеева Э.Р. Особенности развития лесопромышленного комплекса в регионах Российской Федерации // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 6. С. 118–126. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-6-118-126
- [4] Sun X., He M., Li Z. Novel engineered wood and bamboo composites for structural applications: State-of-art of manufacturing technology and mechanical performance evaluation // Construction and Building Materials, 2020, no. 249, p. 118751. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118751
- [5] Grigorev I., Shadrin A., Katkov S., Borisov V., Druzyanova V., Gnatovskaya I., Diev R., Kaznacheeva N., Levushkin D., Akinin D. Russian sawmill modernization (a case study). Part 2: improving the efficiency of wood chipping operations // International Wood Products J., 2021, v. 12, no. 2, pp. 128–134. DOI: 10.1080/20426445.2020.1871276
- [6] Hosseini S.M., Peer A. Wood products manufacturing optimization: A survey // IEEE Access, 2022, v. 10, pp. 121653–121683. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3223053
- [7] Пастори З., Горбачева Г.А., Санаев В.Г., Мохачине И.Р., Борчок З. Состояние и перспективы использования древесной коры // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 5. С. 74–88. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-5-74-88
- [8] Кулагин Е.П. Технологии использования отходов и малоценных продуктов химической переработки древесины: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.03. Нижний Новгород, 2001. 361 с.
- [9] Sandberg D., Haller P., Navi P. Thermo-hydro and thermo-hydro-mechanical wood processing: An opportunity for future environmentally friendly wood products // Wood Material Science & Engineering, 2013, no. 8(1), pp. 64–88. DOI: 10.1080/17480272.2012.751935
- [10] Казымов Д.С., Махотина Л.Г., Никандров А.Б., Кузнецов А.Г., Аким Э.Л. Особенности переработки древесины *Larix sibirica* Ledeb (Pinaceae) в волокнистые полуфабрикаты высокого выхода // Химия растительного сырья, 2021. № 1. С. 317–325. DOI: 10.14258/JCPRM.2021018472
- [11] Singh J., Ordoñez I. Resource recovery from post-consumer waste: important lessons for the upcoming circular economy // J. of Cleaner Production, 2016, no. 134, pp. 342–353. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.12.020
- [12] Faremi O.E., Sogbanmu T.O., Adeyemo O.K. How sawmill wastes impact surface water, sediment, macrobenthic invertebrates, and fish: a case study of the Lagos lagoon, Okobaba Area, South-western Nigeria // Environmental Monitoring and Assessment, 2021, no. 193, pp. 1–13. DOI: 10.1007/s10661-021-09006-0
- [13] Жарская Я.П., Федосенко И.Г. Получение топливных гранул с высокими качественными характеристиками из щепы низкого качества // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов, 2023. № 2 (270). С. 210–216. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-24
- [14] Dudziec P., Stachowicz P., Stolarski M. J. Diversity of properties of sawmill residues used as feedstock for energy generation // Renewable Energy, 2023, no. 202, pp. 822–833. DOI: 10.1016/j.renene.2022.12.002
- [15] Sandberg D., Gorbacheva G., Lichtenegger H., Niemz P., Teischinger A. Advanced Engineered Wood-Material Concepts. In: Niemz, P., Teischinger, A., Sandberg, D. (eds) Springer Handbook of Wood Science and Technology // Springer Handbooks. Springer, Cham, 2023, pp. 1835–1888. DOI: 10.1007/978-3-030-81315-4_35

- [16] Сафин Р.Г., Зиятдинов Р.Р., Сотников В.Г., Рябушкин Д.Г., Ахметова Д.А. Моделирование процесса сушки древесных отходов в установке производства активированного угля // Системы. Методы. Технологии, 2021. № 4. С. 79–86. DOI: 10.18324/2077-5415-2021-4-79-86
- [17] Валеев И.А. Термическая переработка отходов деревообрабатывающих предприятий: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08. Казань, 2006. 153 с.
- [18] Булатов А.Ф. Обоснование процесса заготовки и переработки биомассы дерева на технологическую щепу с целью ресурсосбережения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Санкт-Петербург, 2001. 19 с.
- [19] Rejda M., Czardybon A., Ignasiak K., Robak J. Utilization of waste forest biomass: Pelletization studies of torrefied sawmill wood chips // Proc. of the 11th Conference on Interdisciplinary Problems in Environmental Protection and Engineering EKO-DOK 2019, Polanica-Zdrój, Poland, April 8–10, 2019. E3S Web of Conferences, 2019, v. 100, p. 00068. DOI: 10.1051/e3sconf/201910000068
- [20] Amiandamhen S.O., Adamopoulos S., Adl-Zarrabi B., Yin H., Norén J. Recycling sawmilling wood chips, biomass combustion residues, and tyre fibres into cement-bonded composites: Properties of composites and life cycle analysis // Construction and Building Materials, 2021, no. 297, p. 123781. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123781
- [21] Kowaluk G., Wronka A. Bonding of sawmill birch wood with selected biopolymer-based glues. Annals of Warsaw University of Life Sciences SGGW Forestry and Wood Technology, 2020, no. 109, pp. 32–36. DOI: 10.5604/01.3001.0014.3092
- [22] Mirski R., Dukarska D., Derkowski A., Czarnecki R., Dziurka D. By-products of sawmill industry as raw materials for manufacture of chip-sawdust boards // J. of Building Engineering, 2020, no. 32, p. 101460. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101460
- [23] Тулузаков Д.В., Спиринов Б.Л. Модель формирования насыпной структуры пакета композиционного материала из измельченных древесных частиц // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2018. Т. 22. № 2. С. 95–103. DOI: 10.18698/2542-1468-2018-2-95-103
- [24] Степанов В.И., Мезина Н.А. Отходы лесной промышленности и их использование в национальном хозяйстве // Вестник Российского экономического университета им. Г. В. Плеханова, 2012. № 3. С. 83–88.
- [25] Морозов Д.К., Морозова И.В., Васильев С.Б. Использование мягких отходов лесопиления с целью производства топливных брикетов // Resources and Technology, 2018. Т. 15. № 3. С. 1–28. DOI: 10.15393/j2.art.2018.4181
- [26] Parajuli R. Wood pellets versus pulp and paper: Quantifying the impacts of wood pellets on the pulpwood markets in the southeastern United States. Journal of Cleaner Production, 2021, no. 317, p. 128384. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128384
- [27] Civitarese V., Acampora A., Sperandio G., Assirelli A., Picchio R. Production of wood pellets from poplar trees managed as coppices with different harvesting cycles // Energies, 2019, v. 12, no. 15, p. 2973. DOI: 10.3390/en12152973
- [28] Thiffault E., Barrette J., Blanchet P., Nguyen Q.N., Adjalle K. Optimizing quality of wood pellets made of hardwood processing residues // Forests, 2019, v. 10, no. 7, p. 607. DOI: 10.3390/f10070607
- [29] Quinteiro P., Tarelho L., Marques P., Martín-Gamboa M., Freire F., Arroja L., Dias A.C. Life cycle assessment of wood pellets and wood split logs for residential heating. Science of the Total Environment, 2019, v. 689, pp. 580–589. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.420
- [30] Свиридов Л.Т., Дорняк О.Р. Реология древесины в процессах ее модифицирования // Записки Горного института, 2005. Т. 166. С. 239–241.
- [31] Михеев М.В. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез материалов на основе дисилицида молибдена в условиях давления со сдвигом: дис. ... канд. техн. наук: 17.10.18. Черноголовка, 2018. 141 с.
- [32] Kamperidou V. Quality Analysis of Commercially Available Wood Pellets and Correlations between Pellets Characteristics // Energies, 2022, v. 15, no. 8, p. 2865. DOI: 10.3390/en15082865
- [33] Lehmann B., Schröder H.W., Wollenberg R., Repkeet J.U. Effect of miscanthus addition and different grinding processes on the quality of wood pellets // Biomass and bioenergy, 2012, no. 44, pp. 150–159. DOI: 10.1016/j.biombioe.2012.05.009
- [34] Анциферов В.Н., Перельман В.Е. Механика процессов прессования порошковых и композиционных материалов. М.: Грааль, 2001. 628 с.
- [35] Бучацкий Л.М., Столин А.М. Высокотемпературная реология СВС-материалов // Инженерно-физический журнал, 1992. Т. 63. № 5. С. 593–604.
- [36] Петросян Г.Л. Пластическое деформирование порошковых материалов. М.: Металлургия, 1988. 152 с.
- [37] Nielsen S.K., Rezaei H., Mandø M., Sokhansanj S. Constitutive modelling of compression and stress relaxation in pine pellets // Biomass and Bioenergy, 2019, no. 130, p. 105370. DOI: 10.1016/j.biombioe.2019.105370
- [38] Pietsch W.B. Agglomeration processes: phenomena, technologies, equipment. Weinheim: John Wiley & Sons, 2008. DOI: 10.1002/9783527619801
- [39] Чибирев О.В., Куницкая О.А., Давтян А.Б. Анализ исследований процесса брикетирования отходов лесопереработки на гидравлическом прессовом оборудовании // Resources and Technology, 2019. Т. 16. № 2. С. 97–118. DOI: 10.15393/j2.art.2019.4522

Сведения об авторах

Михеев Максим Валерьевич  — канд. техн. наук, науч. сотр. лаборатории № 7 «Пластического деформирования материалов» ФГБУН «Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения имени А.Г. Мержанова Российской академии наук» (ИСМАН), mmixeev00@mail.ru

Комина Алиса Вадимовна — магистрант ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), kominaalisa005@gmail.com

Горбачева Галина Александровна — канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), gorbacheva@bmstu.ru

Калинина Алена Анатольевна — ст. преп. ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), kalinina@mgul.ac.ru

Болоцкая Анастасия Вадимовна — канд. техн. наук, научный сотрудник лаборатории № 7 «Пластического деформирования материалов» ФГБУН «Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения имени А.Г. Мержанова Российской академии наук» (ИСМАН), moon@ism.ac.ru

Санаев Виктор Георгиевич — д-р техн. наук, профессор, директор Мытищинского филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», vsanaev@bmstu.ru

Столин Александр Моисеевич — д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. лабораторией №7 «Пластического деформирования материалов» ФГБУН «Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения имени А.Г. Мержанова Российской академии наук» (ИСМАН), amstolin@ism.ac.ru

Поступила в редакцию 22.10.2023.

Одобрено после рецензирования 20.12.2023.

Принята к публикации 06.02.2024.

STUDY OF DISINTEGRATED PINE WOOD RHEOLOGICAL BEHAVIOR UNDER UNI-AXIAL COMPRESSING

M.V. Mikheev², A.V. Komina¹, G.A. Gorbacheva¹, A.A. Kalinina¹,
A.V. Bolotskaya², V.G. Sanaev¹, A.M. Stolin²

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

²Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science Russian Academy of Sciences (ISMAN), 8, Academician Osipyan st., 142432, Chernogolovka, Moscow reg., Russia

mmixeev00@mail.ru

Materials for studying the rheological behavior of disintegrated pine wood under uniaxial compressing are presented. The kinetics of disintegrated pine wood deformation was studied in the mode of constant speed movement of the press plunger using a rheological approach. Rheological stress-strain curves were constructed for various fractions ($d < 1$ mm; $1 < d < 2$; $2 < d < 3$; $d > 5$). Compression curves of compact density versus pressure were obtained. It has been shown that fractions with particle sizes less than 1 mm have the best compressibility parameters and achieve higher densities at lower pressures ($\rho_{\text{zar}} = 1,03$ g/cm³ at $P = 180$ MPa). Other studied fractions had approximately the same compressibility and density ρ_{zar} in the range of 0,85...0,90 g/cm³ at $P = 140...160$ MPa. A further increase in pressure level did not lead to an increase in density due to elastic expansion after removal of the load. The greatest strength of pressings was determined when a fraction of more than 5 mm in size. An installation and a method for assessing the strength of pressings in free settling are proposed. The results obtained can be used to optimize the process of pressing disintegrated wood and develop more efficient methods for using wood resources. **Keywords:** rheology, pressing, disintegrated pine wood, waste from logging and wood processing industries

Suggested citation: Mikheev M.V., Komina A.V., Gorbacheva G.A., Kalinina A.A., Bolotskaya A.V., Sanaev V.G., Stolin A.M. *Issledovanie reologicheskogo povedeniya izmel'chennoy drevesiny sosny pri odnoosnom pressovanii* [Study of disintegrated pine wood rheological behavior under uni-axial compressing]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 2, pp. 116–126. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-116-126

References

- [1] *Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 11 fevralya 2021 g. № 312-r Strategiya razvitiya lesnogo kompleksa Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda* [Order of the Government of the Russian Federation of February 11, 2021, no. 312-r Strategy for the development of the forestry complex of the Russian Federation until 2030]. Available at: <http://static.government.ru/media/files/pFdtqWFH8y9SfQjDE0Xnwd8eXWoJJMYB.pdf> (accessed 20.10.2023).

- [2] Vlasov Yu.N. *Nauchnye osnovy sovershenstvovaniya tekhnologii briketirovaniya otkhodov lesopererabotki* [Scientific basis for improving the technology of briquetting wood waste]. Diss. Dr. Sci. (Tech.). Arkhangel'sk, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 2021, 261 p.
- [3] Trofimova N.V., Sazykina M.Yu., Mamleeva E.R. *Osobennosti razvitiya lesopromyshlennogo kompleksa v regionah Rossiyskoy Federacii* [Features of the development of the timber industry complex in the regions of the Russian Federation]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, v. 25, no. 6, pp. 118–126. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-6-118-126
- [4] Sun X., He M., Li Z. Novel engineered wood and bamboo composites for structural applications: State-of-art of manufacturing technology and mechanical performance evaluation. *Construction and Building Materials*, 2020, no. 249, p. 118751. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118751
- [5] Grigorev I., Shadrin A., Katkov S., Borisov V., Druzhanova V., Gnatovskaya I., Diev R., Kaznacheeva N., Levushkin D., Akinin D. Russian sawmill modernization (a case study). Part 2: improving the efficiency of wood chipping operations. *International Wood Products J.*, 2021, v. 12, no. 2, pp. 128–134. DOI: 10.1080/20426445.2020.1871276
- [6] Hosseini S.M., Peer A. Wood products manufacturing optimization: A survey. *IEEE Access*, 2022, v. 10, pp. 121653–121683. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3223053
- [7] Pásztozy Z., Gorbacheva G.A., Sanaev V.G., Mohácsiné I.R., Börcsök Z. *Sostoyanie i perspektivy ispol'zovaniya drevesnoy kory* [State and prospects of tree bark use]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, v. 24, no. 5, pp. 74–88. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-5-74-88
- [8] Kulagin E.P. *Tekhnologii ispol'zovaniya otkhodov i malotsennykh produktov khimicheskoy pererabotki drevesiny* [Technologies for the use of waste and low-value products of chemical wood processing]. Diss. Dr. Sci. (Tech.). Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 2001, 361 p.
- [9] Sandberg D., Haller P., Navi P. Thermo-hydro and thermo-hydro-mechanical wood processing: An opportunity for future environmentally friendly wood products. *Wood Material Science & Engineering*, 2013, no. 8(1), pp. 64–88. DOI: 10.1080/17480272.2012.751935
- [10] Kazymov D.S., Makhotina L.G., Nikandrov A.B., Kuznetsov A.G., Akim E.L. *Osobennosti pererabotki drevesiny Larix sibirica Ledeb (Pinaceae) v voloknistye polufabrikaty vysokogo vykhoda* [Features of Larix sibirica Ledeb wood processing into high yield fibrous semi-finished products]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant materials], 2021, no. 1, pp. 317–325. DOI: 10.14258/JCPRM.2021018472
- [11] Singh J., Ordoñez I. Resource recovery from post-consumer waste: important lessons for the upcoming circular economy. *J. of Cleaner Production*, 2016, no. 134, pp. 342–353. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.12.020
- [12] Faremi O.E., Sogbanmu T.O., Adeyemo O.K. How sawmill wastes impact surface water, sediment, macrobenthic invertebrates, and fish: a case study of the Lagos lagoon, Okobaba Area, South-western Nigeria. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, no. 193, pp. 1–13. DOI: 10.1007/s10661-021-09006-0
- [13] Zharskaya Ya.P., Fedosenko I.G. *Poluchenie toplivnykh granul s vysokimi kachestvennymi kharakteristikami iz shchepy nizkogo kachestva* [Production of fuel pellets with high quality characteristics from low-quality wood chips]. *Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe khozyaystvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyаемых ресурсов* [Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry, environmental management and processing of renewable resources], 2023, no. 2(270), pp. 210–216. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-24
- [14] Dudziec P., Stachowicz P., Stolarski M.J. Diversity of properties of sawmill residues used as feedstock for energy generation. *Renewable Energy*, 2023, no. 202, pp. 822–833. DOI: 10.1016/j.renene.2022.12.002
- [15] Sandberg D., Gorbacheva G., Lichtenegger H., Niemz P., Teischinger A. Advanced Engineered Wood-Material Concepts. In: Niemz, P., Teischinger, A., Sandberg, D. (eds) *Springer Handbook of Wood Science and Technology*. Springer Handbooks. Springer, Cham, 2023, pp. 1835–1888. DOI: 10.1007/978-3-030-81315-4_35
- [16] Safin R.G., Ziatdinov R.R., Sotnikov V.G., Ryabushkin D.G., Akhmetova D.A. *Modelirovanie protsessa sushki drevesnykh otkhodov v ustanovke proizvodstva aktivirovannogo uglya* [Modeling the process of drying wood waste in an activated carbon production plant]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. [Systems. Methods. Technologies.], 2021, no. 4, pp. 79–86. DOI: 10.18324/2077-5415-2021-4-79-86
- [17] Valeev I.A. *Termicheskaya pererabotka otkhodov derevoobrabatyvayushchikh predpriyatiy* [Thermal processing of waste from wood processing enterprises]. Diss. Cand. Sci. (Tech.). Kazan, Kazan State Technological University, 2006, 153 p.
- [18] Bulatov A.F. *Obosnovanie protsessa zagotovki i pererabotki biomassy dereva na tekhnologicheskuyu shchepu s tsel'yu resursoberezheniya* [Justification of the process of harvesting and processing wood biomass into technological chips for the purpose of resource saving]. Abst. Diss. Cand. Sci. (Tech.). St. Petersburg, St. Petersburg State Forestry Academy, 2001, 19 p.
- [19] Rejda M., Czardybon A., Ignasiak K., Robak J. Utilization of waste forest biomass: Pelletization studies of torrefied sawmill wood chips. Proc. of the 11th Conference on Interdisciplinary Problems in Environmental Protection and Engineering EKO-DOK 2019, Polanica-Zdrój, Poland, April 8–10, 2019. *E3S Web of Conferences*, 2019, v. 100, p. 00068. DOI: 10.1051/e3sconf/201910000068
- [20] Amiamdhamen S.O., Adamopoulos S., Adl-Zarrabi B., Yin H., Norén J. Recycling sawmilling wood chips, biomass combustion residues, and tyre fibres into cement-bonded composites: Properties of composites and life cycle analysis. *Construction and Building Materials*, 2021, no. 297, p. 123781. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123781
- [21] Kowaluk G., Wronka A. Bonding of sawmill birch wood with selected biopolymer-based glues. *Annals of Warsaw University of Life Sciences SGGW Forestry and Wood Technology*, 2020, no. 109, pp. 32–36. DOI: 10.5604/01.3001.0014.3092
- [22] Mirski R., Dukarska D., Derkowski A., Czarniecki R., Dziurka D. By-products of sawmill industry as raw materials for manufacture of chip-sawdust boards. *J. of Building Engineering*, 2020, no. 32, p. 101460. DOI: 10.1016/j.job.2020.101460
- [23] Tuluzakov D.V., Spirin B.L. *Model' formirovaniya nasypnoy struktury paketa kompozitsionnogo materiala iz izmel'chennykh drevesnykh chastits* [Model of the formation of a bulk structure of a package of composite material from crushed wood particles]. *Lesnoy Vestnik / Forestry Bulletin*, 2018, v. 22, no. 2, pp. 95–103. DOI: 10.18698/2542-1468-2018-2-95-103
- [24] Stepanov V.I., Mezina N.A. *Othody lesnoy promyshlennosti i ih ispol'zovanie v nacional'nom hozyaystve* [Forest industry waste and its use in the national economy]. *Vestnik Rossiyskogo ekonomicheskogo universiteta im. G.V. Plekhanova* [Bulletin of the Russian Economic University named after G.V. Plekhanov], 2012, no. 3, pp. 83–88.
- [25] Morozov D.K., Morozova I.V., Vasil'ev S.B. *Ispol'zovanie myagkikh otkhodov lesopileniya s cel'yu proizvodstva toplivnykh briketov* [Use of soft sawmill waste for the production of fuel briquettes]. *Resources and Technology*, 2018, v. 15, no. 3, pp. 1–28. DOI: 10.15393/j2.art.2018.4181
- [26] Parajuli R. Wood pellets versus pulp and paper: Quantifying the impacts of wood pellets on the pulpwood markets in the southeastern United States. *J. of Cleaner Production*, 2021, no. 317, p. 128384. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128384

- [27] Civitarese V., Acampora A., Sperandio G., Assirelli A., Picchio R. Production of wood pellets from poplar trees managed as coppices with different harvesting cycles. *Energies*, 2019, v. 12, no. 15, p. 2973. DOI: 10.3390/en12152973
- [28] Thiffault E., Barrette J., Blanchet P., Nguyen Q.N., Adjalle K. Optimizing quality of wood pellets made of hardwood processing residues. *Forests*, 2019, v. 10, no. 7, p. 607. DOI: 10.3390/f10070607
- [29] Quinteiro P., Tarelho L., Marques P., Martín-Gamboa M., Freire F., Arroja L., Dias A.C. Life cycle assessment of wood pellets and wood split logs for residential heating. *Science of the Total Environment*, 2019, v. 689, pp. 580–589. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.420
- [30] Sviridov L.T., Dorniyak O.R. *Reologiya drevesiny v protsessakh ee modifitsirovaniya* [Rheology of wood in the processes of its modification]. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2005, v. 166, pp. 239–241.
- [31] Mikheev M. V. *Samorasprostranyayushchiysya vysokotemperaturnyy sintez materialov na osnove disilitsida molibdena v usloviyakh davleniya so sdvigom* [Self-propagating high-temperature synthesis of materials based on molybdenum disilicide under shear pressure conditions]. Diss. Cand. Sci. (Tech.). Chernogolovka, Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science of Russian Academy of Sciences, 2018, 141 p.
- [32] Kamperidou V. Quality Analysis of Commercially Available Wood Pellets and Correlations between Pellets Characteristics. *Energies*, 2022, v. 15, no. 8, p. 2865. DOI: 10.3390/en15082865
- [33] Lehmann B., Schröder H.W., Wollenberg R., Repkeet J.U. Effect of miscanthus addition and different grinding processes on the quality of wood pellets. *Biomass and bioenergy*, 2012, no. 44, pp. 150–159. DOI: 10.1016/j.biombioe.2012.05.009
- [34] Anciferov V.N., Perel'man V.E. *Mekhanika processov pressovaniya poroshkovykh i kompozitsionnykh materialov* [Mechanics of the processes of pressing powder and composite materials]. Moscow: Graal', 2001, 628 p.
- [35] Buchackiy L.M., Stolin A.M. *Iysokotemperaturnaya reologiya SVS-materialov* [High temperature rheology of SVS materials]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* [J. of Engineering Physics], 1992, v. 63, no. 5, pp. 593–604.
- [36] Petrosyan G.L. *Plasticheskoe deformirovanie poroshkovykh materialov* [Plastic deformation of powder materials]. Moscow: Metallurgiya, 1988, 152 p.
- [37] Nielsen S.K., Rezaei H., Mandø M., Sokhansanj S. Constitutive modelling of compression and stress relaxation in pine pellets. *Biomass and Bioenergy*, 2019, no. 130, p. 105370. DOI: 10.1016/j.biombioe.2019.105370
- [38] Pietsch W.B. *Agglomeration processes: phenomena, technologies, equipment*. Weinheim: John Wiley & Sons, 2008. DOI: 10.1002/9783527619801
- [39] Chibirev O., Kunitskaya O., Davtyan A. *Analiz issledovaniy protsessa briketirovaniya otkhodov lesopererabotki na gidravlicheskom pressovom oborudovanii* [The analysis of research of wood processing wastes briquetting by using hydraulic press equipment]. *Resources and Technology*, 2019, v. 16, no. 2, pp. 97–118. DOI: 10.15393/j2.art.2019.4522

The work was carried out under the state order within the framework of the cooperation agreement between the Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science Problems named after A.G. Merzhanov of the Russian Academy of Sciences (ISMAN) and the Bauman Moscow State Technical University (National Research University) (Mytishchi branch). The equipment and methods of the laboratory No. 7 «Plastic deformation of materials» (ISMAN) and the Centre for Collective Use of Scientific Equipment «Centre for Physical and Mechanical Testing of Wood» (CCP CFMID) of Bauman Moscow State Technical University (Mytishchi branch) were used for the work.

Authors' information

Mikheev Maksim Valer'evich✉ — Cand. Sci. (Tech.), Researcher, Laboratory No. 7 «Plastic Deformation of Materials» Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science of Russian Academy of Sciences (ISMAN), mmixeev00@mail.ru

Komina Alisa Vadimovna — student of the BMSTU (Mytishchi branch), kominaalisa005@gmail.com

Gorbacheva Galina Aleksandrovna — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), gorbacheva@bmstu.ru

Kalinina Alena Anatol'evna — Senior Lecturer of the BMSTU (Mytishchi branch), kalinina@mgul.ac.ru

Bolotskaya Anastasia Vadimovna — Cand. Sci. (Tech.), Researcher, Laboratory No. 7 «Plastic Deformation of Materials» Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science of Russian Academy of Sciences (ISMAN), moon@ism.ac.ru

Sanaev Victor Georgievich — Dr. Sci. (Tech.), Professor, Director of Mytishchi Branch of the BMSTU, vgsanaev@bmstu.ru

Stolin Aleksandr Moiseevich — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of Laboratory No. 7 «Plastic Deformation of Materials» Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science of Russian Academy of Sciences (ISMAN), amstolin@ism.ac.ru

Received 22.10.2023.

Approved after review 20.12.2023.

Accepted for publication 06.02.2024.

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

ДАТИРОВАНИЕ ИЛИ ИСТОРИЯ ПРИРОДЫ И ЧЕЛОВЕЧЕСТВА ЗАПИСАНА НЕ ТОЛЬКО В ГОДИЧНЫХ КОЛЬЦАХ ДРЕВЕСИНЫ (ОБЗОР)

Ю.М. Евдокимов✉, А.А. Гапеев, В.Ю. Прохоров

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

evdokur@mail.ru

Представлен обзор литературных источников, рассматривающих процессы датирования различных объектов (памятников деревянного зодчества, иконописи, античных скульптур, ископаемых животных, растений и т. п.) и событий (их даты и места прошедших землетрясений, извержений вулканов, циклов изменений климата, атмосферных процессов) не только на основе дендрохронологических данных, но с использованием всего мирового опыта научно-технологических достижений. Исследованы шадящие неразрушающие методы датирования памятников деревянного зодчества, произведений иконописи в привычных комнатных условиях с использованием клейких лент (по зарубежной терминологии скотч-метод, так как липкие и клейкие ленты объединены общим названием скотчи — scotch). Суждение о возрасте древесины проводят по показаниям прочности адгезионного соединения, которая изменяется наряду с иными характеристиками древесины (смачиваемость, плотность и т. п.) с возрастом.

Ключевые слова: древесина различного возраста, годовые кольца, клейкие ленты, современные методы датирования

Ссылка для цитирования: Евдокимов Ю.М., Гапеев А.А., Прохоров В.Ю. Датирование или история природы и человечества записана не только в годичных кольцах древесины (обзор) // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 2. С. 127–135. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-127-135

Датирование подлинности тех или иных объектов или событий имеет важное значение в различных областях жизни, науки и технологий: археологии, геологии, архитектуры, книгопечатания, ядерной физики. Вызывает интерес время создания исторических памятников, в частности, деревянного зодчества, иконописи, написания картин известными художниками, музыкальных произведений, музейных ценностей, античных скульптур. Важны точные данные землетрясений, извержений вулканов, особенно разрушительных, этапов изменения климата. Значимым датирование является и для установления подлинности произведений искусства, архитектурных сооружений, скульптурных комплексов, ювелирных украшений, этапов исторического развития человечества для оценки различных событий (циклических изменений климата и атмосферных процессов), возраста ископаемых животных и растений. Например, споры о подлинности плащаницы, в которую было завернуто тело Иисуса Христа, снятое с креста, на котором он был распят, коснулись всей мировой науки и имеющихся технологий, расшифровка дат изготовления (написания) тибетских деревянных дощечек («книг») из древних храмов г. Лхаса и иных с записями событий того времени.

Цель работы

Цель работы — изучение процесса датирования времени создания различных объектов или исторических событий с использованием мирового опыта научно-технологических достижений.

Результаты и обсуждение

Древесине и материалам, созданным на ее основе, уделено немало внимания, поскольку из древесины, как и из камня, начиная с глубокой древности стали изготавливать разнообразные изделия и конструкции, так как материал легко поддавался обработке. Продолжительность жизни деревьев иногда достигает более 4000 лет, поэтому датирование древесины по годовым кольцам (своего рода книге жизни дерева) несет в себе большой объем информации. Проведение датирования требует мастерства, граничащего с искусством. Прежде всего, необходимо профессионально подготовить спил дерева, провести исследования, подсчитать количество колец, измерить их ширину, в том числе с помощью компьютеров, учесть множество факторов.

Многолетняя древесина может быть темнее по цвету, иногда с синевой и изменением механических и физико-химических характеристик [1–18], в отличие от более молодых экземпляров. При 500-летнем возрасте дерево может быть насквозь

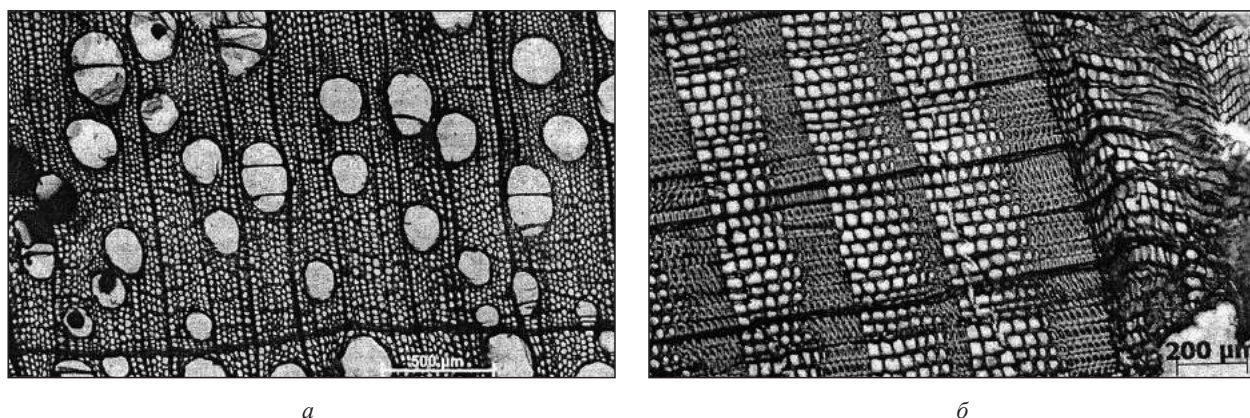


Рис. 1. Годичные кольца ореха маньчжурского (а) и сосны обыкновенной (трахеиды) (б) [17]
Fig. 1. Annual rings of Manchurian walnut (a) and Scots pine (tracheids) (b) [17]

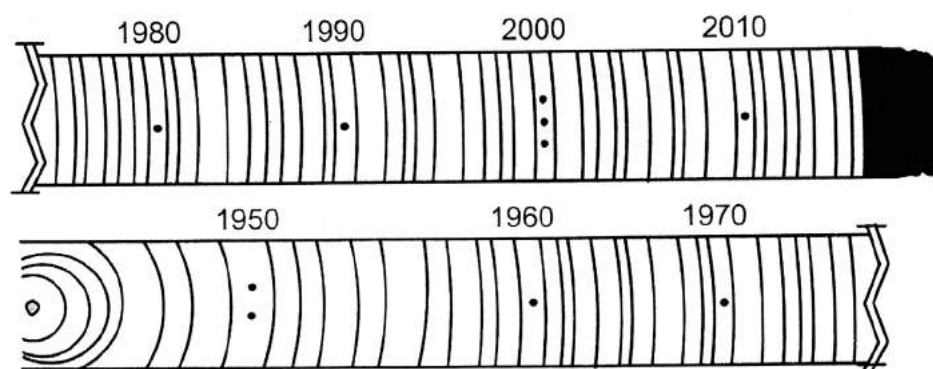


Рис. 2. Схемы маркировки годичных колец на буровом образце [17]
Fig. 2. Schemes of marking annual rings on a drill sample [17]

пропитано смолами текущего года, что потребует его тщательной очистки [18]. Исследования искусственно состаренной древесины или изделий, изготовленных из нее, вызывает определенные сложности, обусловленные термическим воздействием на материал еще до обработки или его пропиткой нефтяными смолами. Без очистки от примесей можно получить «состаренную древесину» из более «молодой».

Основным методом дендрохронологического подхода является изучение изменчивости годового прироста (ширины годичных колец) деревьев, точное датирование образования годичных колец (рис. 1, 2). При наличии достаточного объема необходимых данных можно проводить изучение, реконструкцию и прогнозирование изменений климата, влияния антропогенного воздействия на лесные экосистемы, а также датирование прошедших землетрясений, вулканических извержений, схода лавин и селей, контроль законности вырубок (судебно-биологическую экспертизу) [1–12, 14–29].

Собрано достаточно материала по изучению влияния на окружающую среду антигололедных реагентов, атмосферного и почвенного загрязнения, в том числе атмосферного и земного электри-

чества, т. е. теллурических токов, поскольку все они оставляют свои «автографы» на древесине. Некоторые из них можно «залечить», другие — нет.

Сосну и лиственницу можно отнести к деревьям-огнелюбам. Лиственница, например, способна залечить повреждения от перенесенных пожаров [16]. Деревья, выжившие после пожара, увеличивают индекс годового прироста, что также фиксируется на годичных кольцах.

В 1974 г. был создан Международный банк данных о древесных кольцах (International Tree-Ring Data Bank — ITRDB) и в различных странах имеются шкалы (tree-rings) дендрохронологии, облегчающие дендрохронологическую экспертизу. Современная лаборатория дендрохронологии имеется и в Мытищинском филиале МГТУ им. Баумана, в которой можно установить место произрастания, время рубки дерева, доказать принадлежность образцов стволу одного дерева, провести эталонное датирование по коэффициентам корреляции между рядами прироста, определить вспышки численности вредителей. Все перечисленные показатели специфически влияют на годичные кольца деревьев, отражаясь в их изменчивости.

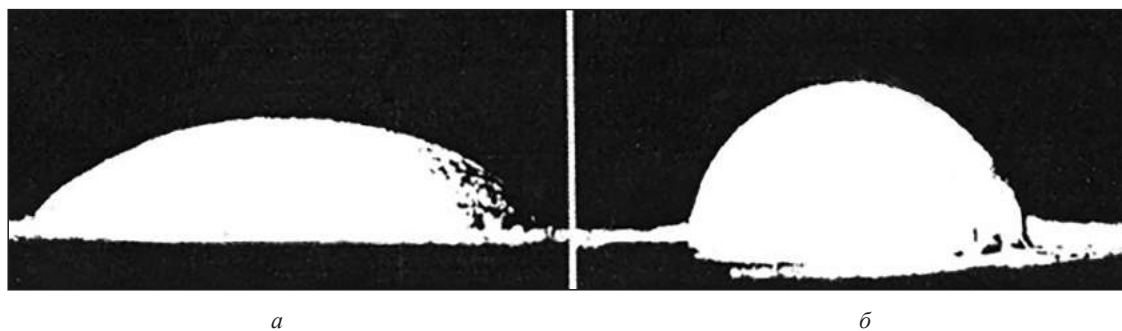


Рис. 3. Форма капель воды на образцах древесины различного возраста [2]: *a* — сосна современная; *б* — сосна 1625 года

Fig. 3. Shape of water droplets on wood samples of different ages [2]: *a* — modern pine; *b* — pine of 1625 years old

Возраст спиленной древесины не позволяет точно определить время создания памятников из нее. В частности, это касается церкви Преображения Господня на острове Кижы в Карелии, а также произведений иконописи, старинных музыкальных инструментов, изготовленных из древесины. Материал мог долго находиться на складе, десятилетиями подвергаться естественной сушке. В связи с этим необходимы некоторые дополнительные работы с привлечением специалистов широкого профиля, в том числе физиков, химиков, математиков, реставраторов, древесиноведов, приборостроителей, искусствоведов, причем последние не должны доминировать [2].

Первоначально следует проводить тщательное наблюдение за состоянием срезов дерева визуально на глаз и с помощью лупы:

- цветом древесины (старая древесина темнее, иногда с различными оттенками);

- запахом (к примеру, современная ель запаха не имеет, однако через 200...300 лет эксплуатации у древесины ели сначала появляется «кислый» запах, а затем запах ванилина, что позволяет грубо идентифицировать породу [2].

Имеют специфический запах кипарис и можжевельник, древесина сосны в любом возрасте пахнет скипидаром. Породы древесины, цвет, запах, вкус, поражение насекомыми, тактильные ощущения (подушечки пальцев человека улавливает шероховатость до 50 нм) — все это может помочь при экспертизе датирования, методе перекрестного датирования, дополнить другие признаки. Например, мастер по изготовлению гитар Якоб Штайнер (Германия) проводил отбор древесных стволов по их тембровым характеристикам на слух, когда спиленный ствол падал с горы на землю [2]. При наблюдении за строением крыльев ос и плодовых мушек на фоне черной подложки, а не белой бумаги, Е. Шевцовой и соавт. из Швеции и США удалось надежно различить три вида ос, ранее неизвестных мировой науке, что подробно описано [30]. Что касается

конкретных работ по датированию древесины и материалов на ее основе, то их немало [1–18, 24, 26, 28, 29].

Нет годичных колец у баобаба и определить его точный возраст не удастся. В таких случаях используются другие подходы и методы.

Как и у любого метода, у дендрохронологического метода [5] имеются определенные ограничения, связанные с необходимостью исследования крупных по массе и размерам образцов и невозможностью взятия проб из некоторых изделий, особенно из художественных произведений. Кроме того, свойства современной и старой древесины иногда существенно отличаются по адгезионному средству (прочность адгезионного соединения — ПАС) с клейкими лентами (скотчами) и иными клеями, углам смачивания жидкостями, плотностью [1–3, 11, 29, 31]. Проведены подробные исследования зависимости ПАС в системе древесина различных пород — клейкая лента марки КЛТ Кусковского химического завода (и иные) [13, 31]. Показано, что на образцах сосны и ели с увеличением возраста древесины наблюдалось снижение ПАС (оцененной методом отслаивания) с клейкой лентой в 2 раза и более при практически равной влажности [2, 3, 12, 13, 31]. Такая же тенденция обнаружена и другими авторами при испытании ПАС на отрыв и скалывание [11]. Краевые углы смачивания водой имели более высокие значения на образцах старой древесины [2] (рис. 3), что хорошо согласуется с оценкой равновесной адгезии (ее понижения) по уравнению Дюпре — Юнга (клейкие смолы-адгезивы можно условно принять за жидкие тела). Одновременно с изучением структуры древесины (современной и старой) выявлены значительные изменения (физико-механические и химические) в свойствах старой и современной древесины (рис. 4, см. рис. 3), что подробно описано [1–3, 12]. Вырывы и деформированная срединная пластинка свидетельствуют о потере прочности 300-летней ели [2].

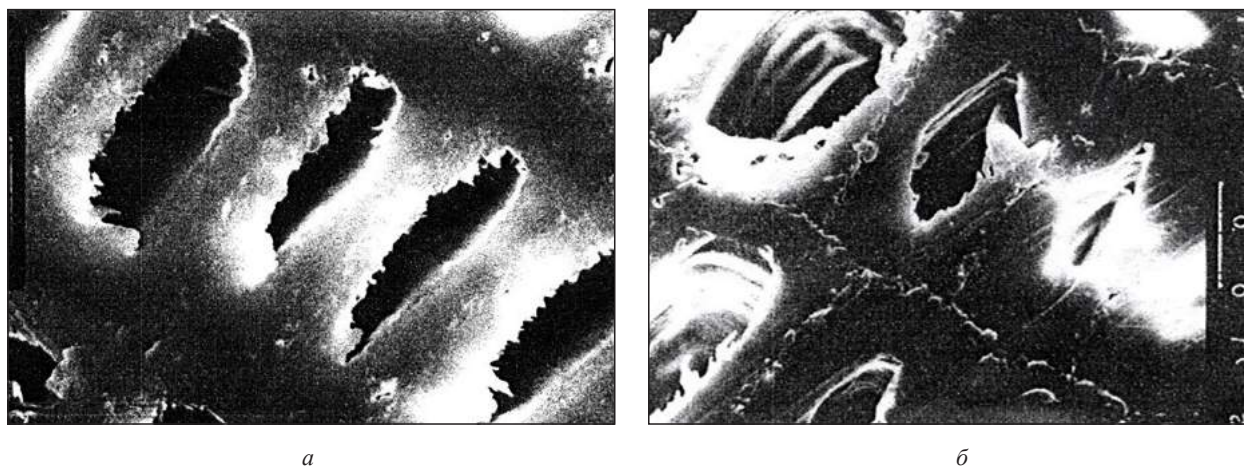


Рис. 4. Поздняя зона годичного слоя современной ели (а) и 300-летней (б) (ув.: $\times 2000$)
Fig. 4. Late zone of the annual layer of modern spruce (a) and 300-year-old spruce (b) (Eq.: $\times 2000$)

В ходе исследований разработана новая методика датирования древних артефактов из древесины с использованием «скотч-метода» наряду с оценкой других показателей: смачиваемости, плотность, модуль упругости, содержание лигнина, гемицеллюлозы, пористости [2] — без разрушения древних артефактов, в частности, икон, для исследования адгезионных характеристик которых достаточно проводить измерения ПАС на тыльной стороне, не затрагивая их лицевую сторону. При этом можно проводить исследования ПАС (адгезионного сродства) на образцах древесины различных разрезов-срезов (торцевом или поперечном, радиальном, тангенциальном) в зависимости от сохранности того или иного элемента изделия, что расширяет возможности предложенного метода датирования.

Закономерности изменения ПАС сохраняются на всех видах срезов. При адгезионном расслаивании на паре сосна обыкновенная — клейкая лента КЛТ максимальная ПАС оказалась характерной для торцевого среза, минимальная — для тангенциального с разницей почти в 3 раза. Сравнительные испытания проводились на современной древесине при отслаивании под углом 180° , давлении прижима $0,02$ МПа на воздухе в интервале скоростей отслаивания $0,02 \dots 0,12$ см/с. Использование клейких лент при датировании имеет и другие преимущества: не требуется наличия больших масс образцов для проведения анализов, как при дендрохронологическом методе. Кроме того, метод прост, может быть использован в полевых условиях. Исходя из оценки адгезионных свойств древесины, прошедшей длительные сроки эксплуатации и иных показателей, повысилась достоверность определения даты рубки древесины с высокой точностью ± 15 лет [2]. При этом учитывались важные особенности, в частности возникновение ложных колец. К примеру, они

могли возникнуть, если вследствие неблагоприятного (засушливого или холодного) лета вегетация дерева начиналась осенью, однако лишь в тех случаях, когда образцы крупных размеров.

Современные методы позволяют определять возраст дерева, не причиняя ему вреда, высверливая буравчиком столбики толщиной с грифель (около 1 мм), а затем проводя исследования с использованием микроскопов и иных приборов. Определять возраст деревьев по годичным кольцам впервые предложил еще Леонардо да Винчи, предположивший, что ширина годичного кольца зависит от климата [7].

В настоящее время по годичным кольцам можно узнать об извержении вулканов, датах землетрясений, их силе, даже извлечь информацию о взрывах сверхновых звезд в галактике. Годичные кольца деревьев несут в себе информацию о степени загрязнения атмосферы в различные годы, о последствиях ядерных испытаний и т. п. [18]. Анализ химического состава годичных колец позволяет изучить распределение рассеянных элементов в разные временные периоды.

Для надежности и достоверности получаемых данных, для более точного датирования разнообразных объектов применяются современные технологии, в частности рентгеновский флуоресцентный анализ, лазерная (РЕМР) масс-спектрометрия, X-лучевая радиография, сканирующая и электронная оптическая микроскопия, люминесцентный анализ, хроматография, метод ядерной геохронологии с использованием синхротронного излучения, рамановская спектроскопия, анализ углов смачивания и адгезионной способности [1–10, 12, 14–25, 27–29, 31, 32, 34, 35]. Методы датирования постоянно совершенствуются, используются щадящие неразрушающие методики, которые можно применять в привычных «комнатных» условиях [1–3, 10, 12, 17, 18, 19, 25, 26, 28, 32, 34, 35].



Рис. 5. К. Хокусай. Большая волна в Канагаве (1823–1831). Бумага, чернила, водяные краски. Гравюра 25,4×38,1 см. Метрополитен-музей, Нью-Йорк
Fig. 5. K. Hokusai. The Great Wave in Kanagawa (1823-1831). Paper, ink, water colours. Engraving 25,4×38,1 cm. Metropolitan Museum of Art, New York

Новый метод радиоуглеродного датирования (по оценке содержания радиоактивного изотопа углерода ^{14}C в древних находках) охватывает временной отрезок в 53 тыс. лет (по некоторым данным до 70 тыс. лет вместо прежних 40 тыс. лет) [2, 7, 18]. Ранее для исследований требовалось несколько десятков граммов датированного материала, в настоящее время для единственного в России ускорительного масс-спектрометра (УМС), разработанного новосибирскими учеными (В. Пархомчук и соавт.), для выполнения датирования необходимо лишь 1–3 мг углерода, тем не менее будет обеспечен практически поштучный подсчет изотопов [18]. С помощью УМС можно проводить датирование древних артефактов, в частности, находки археологов возрастом до 70 тыс. лет, и не отправлять их в зарубежные лаборатории. Что касается дендрохронологии, российские ученые занимают одно из лидирующих мест в мире.

Датирование осуществляется не только на образцах древесины или изделий из нее, но и на других объектах. Так, датируются картины известных художников, что позволяет подтвердить их подлинность путем установления даты написания. При этом есть случаи, не требующие датирования, поскольку, например, написание картин «фрактальным стилем» практически невозможно подделать, их идентифицируют по манере письма. К таким относятся картины американского художника Джексона Поллока и японского художника К. Хокусай (рис. 5). То же самое можно сказать о картинах с искаженной перспективой голландского

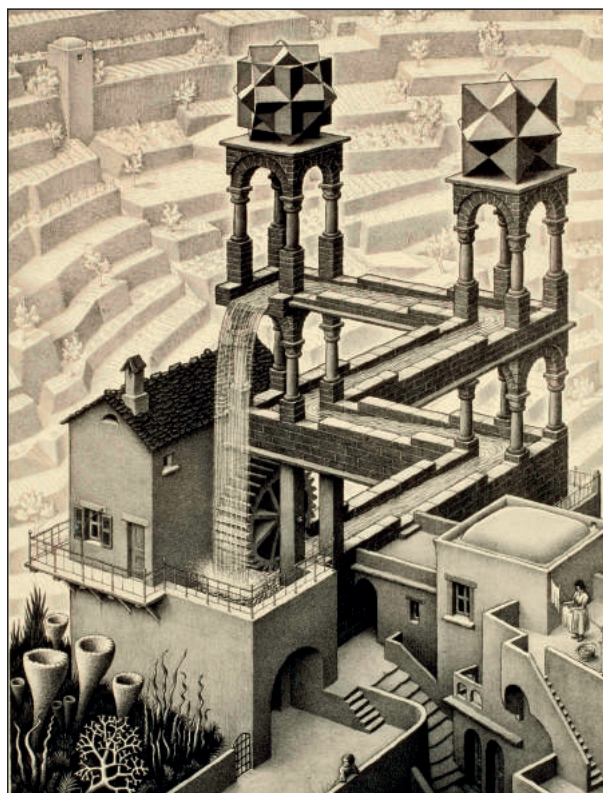


Рис. 6. М.К. Эшер. Водопад (1961). Литография 38×30 см. Музей Израиля, Иерусалим
Fig. 6. M.C. Escher. Waterfall (1961). Lithograph 38×30 cm. Israel Museum, Jerusalem

художника М.К. Эшера (рис. 6). А вот с наследием голландца Винсента Ван Гога «потеют» до сих пор специалисты самого широкого профиля.

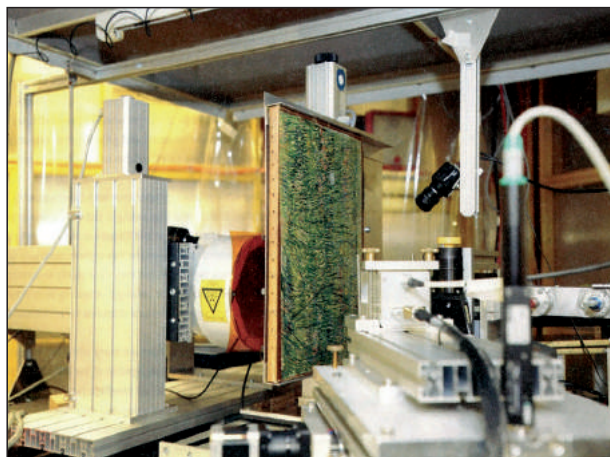


Рис. 7. Общий вид установки синхротронного излучения (исследовательский центр по физике частиц DESY в Гамбурге, Германия), используемая для датирования произведений искусства и иных объектов с новым уровнем детализации

Fig. 7. General view of the synchrotron radiation facility (DESY particle physics research centre in Hamburg, Germany) used to date works of art and other objects with a new level of detail

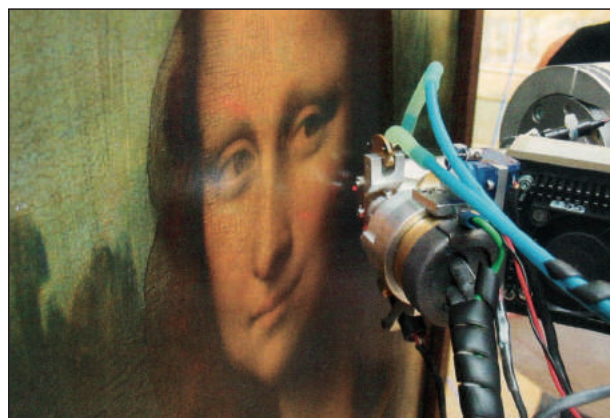


Рис. 8. Общий вид установки X-лучевой флуоресцентной спектроскопии, которая осуществляет сканирование слоев краски по толщине слой за слоем (по 1–2 мкм) [36]

Fig. 8. General view of the X-beam fluorescence spectroscopy facility, which scans paint layers layer by layer (1–2 μm) [36]

Для того чтобы отличить полотна художника от подделок, в 2007 г. были разработаны методы анализа комплементарных сочетаний цветов (синего и желтого), которые Винсент Ван Гог использовал для контуров объектов или отдельных фрагментов [32, 33]. Американский астроном Д.У. Олсон разгадал дату — 12 июля 1889 г. — написания картины «Вечерний пейзаж с восходящей Луной» на основе того, что Ван Гог никогда не искажал реальность — он видел событие с астрономической точностью [33].

Другая картина Ван Гога «Звездная ночь» с взвихрившимися звездами продемонстрировала его пристрастие к желтому цвету, используемому не только на этом, но и на других полотнах.

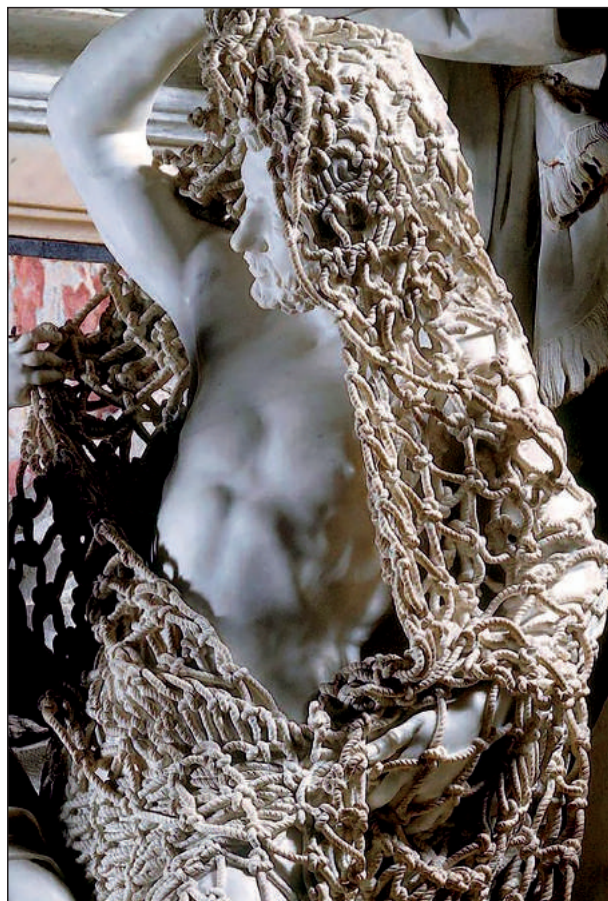


Рис. 9. Ф. Квиоло. Избавление от чар. Фрагмент (1757). Мрамор. Капелла Сан-Северо, Неаполь, Италия

Fig. 9. Quirolo. Dissingano. Fragment (1757). Marble. Chapel of San Severo, Naples, Italy

По мнению ученых-медиков, желтая палитра Ван Гога обязана его эпилепсии. Художник принимал лекарство — дигиталис [33], способствующий усилению желтых оттенков в цветовой гамме окружающего мира, видению желтых кругов вокруг звезд. В настоящее время доказано, что лечить эпилепсию этим препаратом бессмысленно.

В настоящее время многие шедевры живописи изучают на предмет их подлинности с помощью современных технологий (рис. 7, 8).

Однако высококлассные подделки до сих пор распространены. Так, художник Т. Китинг выполнил и продал сотни полотен за огромные деньги. Талантливыми мошенниками XX в. также были Э. Мругалла и Т. Тетро, насытившие рынок тысячами лжеполотен Рембрандта, Ван Гога, Гогена, Рубенса и других известных мастеров, которыми, тем не менее, по сей день восхищаются искусствоведы всего мира. Правда, есть еще шедевры, в частности в области скульптурного творчества, которые в принципе невозможно подделать, хотя пытались многие. Это, прежде всего, относится к творению итальянского скульптора Франческо Квиоло «Избавление от чар» (Disinganno, 1757).

Сеть из мрамора, накинута на тело мужчины вызывает удивление и восхищение у всех посетителей (рис. 9).

Мексиканские физики нашли новый способ датировки наскальной живописи. Выяснилось, что красная краска, использованная индейцами для фресок, содержала частицы минералов гематита и магнетита. Благодаря им, в рисунках оказалось зафиксировано направление магнитного поля при их нанесении на основу. Поскольку летопись изменений магнитного поля сохранилась и в окружающих горных породах, то по магнетизму рисунков был определен их возраст (800...1000 лет) (Наука и жизнь, раздел новости науки, 2015. № 3. С. 11–12).

Скотчи (клеякие ленты) использовались не только для датирования памятников из древесины, но и при рассмотрении особенностей поверхности скульптур (отпечатков или слепков поверхности) [34] после отслаивания от них клейкой ленты со следами прилипших частичек минералов — кальция и оксидов железа. По времени преобразования одних минералов в другие установили подлинность некоторых мраморных скульптур. Для установления возраста горных пород наибольшую ценность имеет биотит (слюда) из-за содержания в нем радиоактивного изотопа калия-40 (0,00117%), атомные ядра которого распадаются, превращаясь в аргон-49. Измеряя соотношение изотопов калия и аргона, ученые оценивают возраст породы (калий-аргоновое датирование). Наши исследования [29] по слепкам частичек сажи, оставленных на липком слое скотчей после пожара, облегчили проведение дознания по пожарам.

Выводы

Приведен обзор по способам датирования самых различных объектов и событий не только на основе дендрохронологических методов, но с использованием мирового опыта научно-технологических достижений.

Авторами [2, 13, 31] разработан новый щадящий метод (способ) датирования памятников деревянного зодчества, иконописи с использованием клейких лент, который позволил проводить оценку датирования при комнатных условиях. При этом не требуется частичного разрушения образцов, повышается достоверность определения ряда показателей (к примеру, дату рубки древесины удалось измерить с точностью ± 15 лет).

Список литературы

- [1] Покровская Е.Н. Увеличение прочности частично разрушенной древесины памятников деревянного зодчества // Вестник МГСУ, 2018. Т. 13. Вып. 11. С. 1305–1314.
- [2] Пищик И.И. Датирование памятников из древесины. М.: МГУЛ, 2014. 164 с.
- [3] Пищик И.И. Новые возможности методов датирования древесины // Вестник МГУЛ – Лесной Вестник, 2012. № 4. С. 75–77.
- [4] Ваганов Е.А., Шиятов С.Г. Дендроклиматические и дендрозоологические исследования в Северной Евразии // Лесоведение, 2005. № 4. С. 18–27.
- [5] Матвеев С.М., Румянцев Д.Е. Дендрохронология. Воронеж: Изд-во ВГЛТА, 2013. 140 с.
- [6] Fritts H.C. Tree rings and climate. London–New York–San Francisco: Academic Press, 1976. 566 p.
- [7] Петришин В. Самые старые // Химия и жизнь, 1983. № 1. С. 83–85.
- [8] Strakova D., Kozik M. Drevo v historických pamiatkach a jeho ochrana // Museum, 1982, no. 4, pp. 64–68
- [9] Dendrochronology in Europa Res. Laboratory for Archeology and History of Art., Oxford University Publ., 1978, no. 2.
- [10] Станко Я.Н., Горбачева Г.А. Древесные породы и основные пороки древесины. Иллюстрированное справочное пособие для работников таможенной службы / под ред. Н.М. Шматкова, А.В. Беляковой. М.: Изд-во Всемирного фонда дикой природы (WWF), 2010. 155 с.
- [11] Пинджоян М.Л. Влияние старения поверхностных слоев древесины на прочность клеевых соединений // Деревообрабатывающая пром-сть, 1970. № 10. С. 11–12.
- [12] Окамото К. Исследование старения древесины. содержание кристаллической целлюлозы в старых древесных материалах // Нихон рингаккайси, 1955. Т. 37. № 9.
- [13] Евдокимов Ю.М., Арутюнян Р.Е. Клеящие свойства липких лент // Целлюлоза, бумага и картон. М.: Изд-во ВНИПИЭМ, 1970. № 1. С. 9–10.
- [14] Михайлов А. Консервация сухой и влажной археологической древесины. София, 1984. 142 с.
- [15] Алуве К. О дендрохронологической основе памятников архитектуры западной Эстонии // Известия АН Эстонской ССР, Общественные науки, 1980. № 29. С. 343–353.
- [16] Харук В.И., Пономарев В.И. Пожары и гари сибирской тайги // Наука из первых рук, 2020. 2(87). С. 56–71
- [17] Тишин Д.В., Чижикова Н.А. Дендрохронология. Казань: Изд-во Казанского университета, 2018. 34 с.
- [18] Parkhomchuk V.V., Rastigeev S.A. Accelerator mass spectrometer of the center for collective use of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences // J. of Surface Investigation X-ray, Synchrotron and Neutron techniques, 2011, v. 5, issue 6, pp. 1068–1072.
- [19] Вагнер Г.А. Научные методы датирования в геологии, археологии и истории // Ноосфера, 2006. 575 с.
- [20] Jonson S.S., Hebsgard M.B. Ancient bacteria show evidence OFDNT repair // PNAS, 2007, v. 1, no. 04 (36), pp. 14401–14405. <https://doi.org/10.1073/pnas>
- [21] Neumann F.H. Palynology, Sedimentology and palaeology of the late Holocene Dead Sea // Quaternary Science Reviews, 2007, v. 26, no. 11–12 (2007/6/1), pp. 1476–1498.
- [22] Aitken M.J. An introduction to Optical Dating. Oxford: Oxford University Press, 1988, 267 p.
- [23] Бадаш Л. Долгие дебаты о возрасте Земли // В мире науки, 1989. 10. С. 70–78.
- [24] May E., Jones M. Conservation Science — Heritage Materials. RSC Publishing, 2006, 300 p.
- [25] Alvares L.W. Selected works with Commentary by His Students and Colleagues / Ed. W.P. Trower // The University of Chicago Press, 1988, no. 9, pp. 91–92.
- [26] Кузьмин Я.В. Радиоуглеродный метод и его применение в современной науке // Вестник РАН, 2011. Т. 81. № 2. С. 127–133.
- [27] Bell N., McPhail D. Managing change: preserving history // Materials Today, 2007, v. 10, no. 4, pp. 50–56.

- [28] Вихров В.Е. Колчин Б.А. Основы и метод дендрохронологии // Советская археология, 1962. № 1. С. 2–37.
- [29] Евдокимов Ю.М., Сулименко В.А., Сулименко С.В. Аутогезия и адгезия углеродных частиц // Клеи. Герметики. Технологии, 2015. № 12. С. 39–41.
- [30] Shevtsova E. Stable structural color patterns displayed on transparent insect wings // PNAS, 2011, v. 108(2), pp. 668–673.
- [31] Евдокимов Ю.М. Адгезия. От микро- и макроуровня к наносистемам. М.: МГУЛ, 2011. 208 с.
- [32] Sealy C. Looking over the artists Shoulder // Mat. Today, 2008, v. 11, no 11, pp. 40–44.
- [33] Покровский В. Астрономы снова вспоминают Ван Гога // Независимая газета (Приложение НГ-наука). 25 июня 2003 года. С. 16.
- [34] Марголис С.В. Установление подлинности античных мраморных скульптур с помощью геохимических методов // В мире науки, 1989. № 8. С. 66–73.
- [35] Elen S. Humphreys. How to spot a fake // Mat. Today, 2002, pp. 32–37.
- [36] de Viguerie L., Walter P., Laval E., Mottin B. Revealing the stumato Technique of Leonardo da Vinci by X-ray fluorescence Spectroscopy // Angewandte Chemie, 2010, v. 122, no. 35, pp. 6261–6264. <https://doi.org/10.1002/ange.201001116>

Сведения об авторах

Евдокимов Юрий Михайлович — канд. хим. наук, профессор кафедры процессов горения, ФГБОУ ВО «Академия Государственной противопожарной службы МЧС России» (АГПС МЧС России), evdokur@mail.ru

Гапеев Артем Александрович — канд. техн. наук, доцент кафедры процессов горения, ФГБОУ ВО «Академия Государственной противопожарной службы МЧС России» (АГПС МЧС России), kratos_1987@mail.ru

Прохоров Виктор Юрьевич — канд. техн. наук, профессор кафедры механики и графики, ФГБОУ ВО «Академия Государственной противопожарной службы МЧС России» (АГПС МЧС России), prohorovv@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.05.2023.

Одобрено после рецензирования 11.09.2023.

Принята к публикации 19.12.2023.

DATING OR HISTORY OF NATURE AND HUMANITY RECORDED NOT ONLY IN ANNUAL WOOD RINGS (REVIEW)

Yu.M. Evdokimov✉, A.A. Gapeev, V.Yu. Prohorov

State Fire Academy of EMERCOM of Russia, 4, Boris Galushkin st., 129366, Moscow, Russia

evdokur@mail.ru

A review of literary sources is presented that examine the dating processes of various objects (monuments of wooden architecture, icon painting, ancient sculptures, fossil animals, plants, etc.) and events (their dates and places of past earthquakes, volcanic eruptions, climate change cycles, atmospheric processes) not only on the basis of dendrochronological data, but using the entire world experience of scientific and technological achievements. Gentle non-destructive methods of dating monuments of wooden architecture, works of icon painting in familiar indoor conditions using adhesive tapes (according to foreign terminology, the scotch method, since sticky and adhesive tapes are united under the common name scotch) are examined and studied in detail. Judgment about the age of wood is carried out according to the strength of the adhesive joint, which changes, along with other characteristics of wood (wettability, density, etc.).

Keywords: wood of various ages, tree rings, adhesive tapes, modern dating methods


Suggested citation: Evdokimov Yu.M., Gapeev A.A., Prokhorov V.Yu. *Datirovanie ili istoriya prirody i chelovechestva zapisana ne tol'ko v godichnykh kol'tsakh drevesiny (obzor)* [Dating or history of nature and humanity recorded not only in annual wood rings (review)]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 2, pp. 127–135. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-127-135

References

- [1] Pokrovskaya E.N. *Uvelichenie prochnosti chastichno razrushennoy drevesiny pamyatnikov derevyannogo zodchestva* [Increasing the strength of partially destroyed wood of monuments of wooden architecture]. *Vestnik MGSU [Bulletin of MGSU]*, 2018, v. 13, iss. 11, pp. 1305–1314.
- [2] Pishchik I.I. *Datirovanie pamyatnikov iz drevesiny* [Dating of wooden monuments]. Moscow: MGUL, 2014, 164 p.
- [3] Pishchik I.I. *Novye vozmozhnosti metodov datirovaniya drevesiny* [New possibilities of wood dating methods]. Moscow state forest university bulletin – *Lesnoy vestnik*, 2012, no. 4, pp. 75–77.
- [4] Vaganov E.A., Shiyatov S.G. *Dendroklimaticheskie i dendroekologicheskie issledovaniya v Severnoy Evrazii* [Dendroclimatic and dendroecological studies in Northern Eurasia]. *Lesovedenie*, 2005, no. 4, pp. 18–27.
- [5] Matveev S.M., Rumyantsev D.E. *Dendrokhnologiya* [Dendrochronology]. Voronezh: VGLTA, 2013, 140 p.

- [6] Fritts H.C. Tree rings and climate. London–New York–San Francisco: Academic Press, 1976, 566 p.
- [7] Petrishin V. *Samye starye* [The oldest]. *Khimiya i zhizn'* [Chemistry and Life], 1983, no. 1, pp. 83–85.
- [8] Strakova D., Kozik M. Drevo v historiykh pamiatkah a jevo ochrona. Museum, 1982, no. 4, pp. 64–68
- [9] Dendrochronology in Europa Res. Laboratory for Archeology and History of Art. Oxford University Publ., 1978, no. 2.
- [10] Stanko, Ya.N., Gorbacheva G.A. *Drevesnye porody i osnovnye poroki drevesiny. Illyustrirovannoe spravochnoe posobie dlya rabotnikov tamozhennoy sluzhby* [Tree species and main wood defects. Illustrated reference guide for customs officers]. Ed. N.M. Shmatkova, A.V. Belyakova; World Wildlife Fund (WWF). Moscow, 2010, 155 p.
- [11] Pindzhoyan M.L. *Vliyaniye stareniya poverkhnostnykh sloev drevesiny na prochnost' kleyvykh soedineniy* [The influence of aging of surface layers of wood on the strength of adhesive joints]. *Derevoobrabatyvayushchaya prom-st'* [Woodworking industry], 1970, no. 10, pp. 11–12.
- [12] Okamoto K. *Issledovanie stareniya drevesiny. sodержание kristallicheskoj tsellyulozy v starykh drevesnykh materialakh* [Study of wood aging. content of crystalline cellulose in old wood materials]. *Nikhon ringakkaysi* [Nihon Ringakkaishi], 1955, t. 37, no. 9.
- [13] Evdokimov Yu.M., Arutyunyan R.E. *Kleyashchie svoystva lipkikh lent* [Adhesive properties of adhesive tapes]. *Tsellyuloza, bumaga i karton* [Pulp, paper and cardboard]. Moscow: VNIPIEM, 1970, no. 1, pp. 9–10.
- [14] Mikhaylov A. *Konservatsiya sukhoy i vlazhnoy arkhologicheskoy drevesiny* [Conservation of dry and wet archaeological wood]. Sofia, 1984, 142 p.
- [15] Aluve K. *O dendrokronologicheskoy osnove pamyatnikov arkhitektury zapadnoy Estonii* [On the dendrochronological basis of architectural monuments of western Estonia]. *Izvestiya AN Estonskoy SSR, Obshchestvennyye nauki* [News of the Academy of Sciences of the Estonian SSR, Social Sciences], 1980, no. 29, pp. 343–353.
- [16] Kharuk V.I., Ponomarev V.I. *Pozhary i gari sibirskoy taygi* [Fires and burning in the Siberian taiga]. *Nauka iz pervykh ruk* [First-hand science], 2020, no. 2(87), pp. 56–71
- [17] Tishin D.V., Chizhikova N.A. *Dendrokronologiya* [Dendrochronology]. Kazan: Kazan University, 2018, 34 p.
- [18] Parkhomchuk V.V., Rastigeev S.A. Accelerator mass spectrometer of the center for collective use of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. *J. of Surface Investigation X-ray, Synchrotron and Neutron techniques*, 2011, v. 5, iss. 6, pp. 1068–1072.
- [19] Vagner G.A. *Nauchnye metody datirovaniya v geologii, arkhologii i istorii* [Scientific dating methods in geology, archeology and history]. *Noosfera* [Noosphere], 2006, 575 p.
- [20] Jonson S.S., Hebsgard M.B. Ancient bacteria show evidence OFDNT repair. *PNAS*, 2007, v. 1, no. 04 (36), pp. 14401–14405. <https://doi.org/10.1073/pnas>
- [21] Neumann F.H. Palynology, Sedimentology and palaeology of the late Holocene Dead Sea. *Guaterrary Science Reviews*, 2007, v. 26, no. 11–12 (2007/6/1), pp. 1476–1498.
- [22] Aitken M.J. *An introduction to Optical Dating*. Oxford University Press, 1988, 267 p.
- [23] Badash L. *Dolgie debaty o vozraste Zemli* [Long debate about the age of the Earth]. *V mire nauki* [In the world of science], 1989, no. 10, pp. 70–78.
- [24] May E., Jones M. *Conservation Science – Heritage Materials*. RSC Publishing, 2006, 300 p.
- [25] Alvares L.W. *Selected works with Commentary by His Students and Colleagues*. Ed. W.P. Trower. The University of Chicago Press, 1988, no. 9, pp. 91–92.
- [26] Kuz'min Ya.V. *Radiouglerodnyy metod i ego primeneniye v sovremennoy nauke* [Radiocarbon method and its application in modern science]. [Bulletin of the Russian Academy of Sciences], 2011, t. 81, no. 2, pp. 127–133.
- [27] Bell N., McPhail D. Managing change: preserving history. *Materials Today*, 2007, v. 10, no. 4, pp. 50–56.
- [28] Vikhrov V.E. Kolchin B.A. *Osnovy i metod dendrokronologii* [Fundamentals and method of dendrochronology]. *Sovetskaya arkhologiya* [Soviet Archeology], 1962, no. 1, pp. 2–37.
- [29] Evdokimov Yu.M., Sulimenko V.A., Sulimenko S.V. *Autogeziya i adgeziya uglerodnykh chastits* [Autohesion and adhesion of carbon particles]. *Klei. Germetiki. Tekhnologii* [Adhesives. Sealants. Technologies], 2015, no. 12, pp. 39–41.
- [30] Shevtsova E. Stable structural color patterns displayed on transparent insect wings. *PNAS*, 2011, v. 108(2), pp. 668–673.
- [31] Evdokimov Yu.M. *Adgeziya. Ot mikro- i makrourovnya k nanosistemam* [Adhesion. From micro- and macro-level to nanosystems]. Moscow: MGUL, 2011, 208 p.
- [32] Sealy C. Looking over the artists Shoulder. *Mat. Today*, 2008, v. 11, no 11, pp. 40–44.
- [33] Pokrovskiy V. *Astronomy snova vspominayut Van Goga* [Astronomers again remember Van Gogh]. *Nezavisimaya gazeta (Prilozhenie NG-nauka)* [Nezavisimaya Gazeta (NG-science Appendix)], June 25, 2003, p. 16.
- [34] Margolis S.V. *Ustanovleniye podlinnosti antichnykh mramornykh skul'ptur s pomoshch'yu geokhimicheskikh metodov* [Establishing the authenticity of antique marble sculptures using geochemical methods]. *V mire nauki* [In the world of science], 1989, no. 8, pp. 66–73.
- [35] Elen S. Humphreys. How to spot a fake. *Mat. Today*, 2002, pp. 32–37.
- [36] de Viguerie L., Walter P., Laval E., Mottin B. Revealing the stumato Technique of Leonardo da Vinci by X-ray fluorescence Spectroscopy. *Angewandte Chemie*, 2010, v. 122, no. 35, pp. 6261–6264. <https://doi.org/10.1002/ange.201001116>

Authors' information

Evdokimov Yuriy Mikhaylovich  — Cand. Sci. (Chem.), Professor of the Department of Process of fire, State Fire Academy of EMERCOM of Russia, evdokur@mail.ru

Gapeev Artem Aleksandrovich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Process of fire, State Fire Academy of EMERCOM of Russia, kratos_1987@mail.ru

Prokhorov Viktor Yur'evich — Cand. Sci. (Tech.), Professor of the Department of Mechanics and Graphics, State Fire Academy of EMERCOM of Russia, prohorovv@yandex.ru

Received 16.05.2023.

Approved after review 11.09.2023.

Accepted for publication 19.12.2023.

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

РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ХАРВЕСТЕРА ПРИ ВЫБОРОЧНЫХ РУБКАХ ЛЕСА

Т.В. Сергеева, Т.А. Гилязова, К.П. Рукомойников✉

ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», Россия, 424000, Республика Марий Эл, Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 3

rukomojnikovkp@volgatech.net

Существующие на данный момент математические зависимости нацелены лишь на обоснование производительности харвестеров и не дают возможности детального анализа трудоемкости зависящих от природно-производственных условий отдельных элементов времени цикла его работы. В связи с этим, целью данного исследования является обоснование математических закономерностей работы харвестера, позволяющих с достаточным уровнем достоверности осуществлять быстрые технические расчеты производительности и трудозатрат при выполнении различных рубок леса. Для достижения поставленной цели создана имитационная модель работы харвестера на лесосеке и проведены эксперименты на этой модели. Показаны результаты статистической обработки результатов имитационного моделирования. Предложены регрессионные зависимости для расчета средней часовой производительности харвестера, а также расчета отдельных элементов времени цикла его работы, созданные в результате анализа результатов исследования на модели. Определены регрессионные зависимости расчета среднего времени наведения манипулятора на растущее дерево, перемещения поваленного дерева в зону его обработки и среднего времени перемещения харвестера между рабочими позициями в расчете на одно спиленное дерево, обладающие научной и практической новизной. Доказано, что нормирование труда невозможно без учета влияния на эти элементы времени таких показателей, как средний объем хлыста на лесосеке, доля вырубаемого компонента, запас древесины на гектаре и количество крупного подлеска на лесосеке. Показаны диаграммы изменения значений элементов времени цикла в условиях разнообразия природно-производственных условий на различных лесных участках. На основе полученных в статье выводов, разработаны практические и научные рекомендации, повышающие эффективность нормирования труда на лесосечных работах. Полученные регрессионные модели рекомендуются для анализа эффективности работы и нормирования труда при использовании харвестера Silvatec 8266TH.

Ключевые слова: имитационное моделирование, лесозаготовка, лесосека, выборочные рубки, статистическая обработка, регрессионная зависимость, сортиментная заготовка древесины

Ссылка для цитирования: Сергеева Т.В., Гилязова Т.А., Рукомойников К.П. Результаты имитационного моделирования работы харвестера при выборочных рубках леса // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 2. С. 136–149. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-136-149

Системы сортиментной заготовки древесины комплектом машин харвестер + форвардер уже много лет используются в скандинавских странах [1–3]. Почти 100 % сегодняшних заготовок в Швеции и Финляндии осуществляются системами для сортиментной заготовки древесины [4, 5]. В этих и других странах были проведены различные исследования, в том числе анализ производительности [6–8] и оценка харвестера в цепочке поставок древесины потребителям [9–11]. В Северной Америке такие системы используются примерно в 20–30 % случаев [12], на юго-востоке США — еще меньше, т. е. не более 1 % случаев использования [13]. В России доля сортиментной заготовки древесины в общем объеме рубок составляет примерно 30 %, а в северо-западных регионах РФ она достигает 90 %, что связано с небольшими размерами лесосек и наличием в производстве значительного числа

машин, поставлявшихся из граничащей с ними Финляндии [14, 15].

Оценка производственной эффективности машин для сортиментной заготовки древесины приобрела актуальность по причине различных природно-производственных условий на каждой отдельно взятой для анализа лесосеке [16–18]. Оценить влияние всех природно-производственных факторов в реальных производственных условиях затруднительно ввиду необходимости проведения значительного объема экспериментальных исследований в целях достижения достоверных результатов.

Одним из способов анализа работы машин с учетом совокупности влияющих факторов является моделирование технологического процесса лесосечных работ, в частности, имитационное моделирование в области сортиментной заготовки древесины, над которым работали различные отечественные и зарубежные ученые.

Ввиду большого разнообразия условий работы в лесу, изучаемых в процессе моделирования, при анализе производственного процесса и затрат зачастую используется компьютерное моделирование [19–22]. С помощью компьютерного моделирования лесосечных работ с использованием харвестера проведено достаточно много исследований [23–26]. Например, в работе [27] смоделирована система сортиментной заготовки древесины по аналогии с системой бензопила + пакетировочно-трелевочная машина и системой валочно-пакетирующая машина + пакетировочно-трелевочная машина.

В других исследованиях, система харвестер — форвардер оценивалась с использованием метода дискретного моделирования событий [28]. В качестве исходных данных использовалось статистическое распределение, полученное на основе данных полевых исследований. По результатам моделирования было разработано уравнение линейной регрессии для производственного процесса системы.

Имитационная модель, созданная Ю.В. Сухановым и др. [29] моделирует определение следующей технологической стоянки, движения, валки и обработки деревьев и дает возможность многократной имитации технологического процесса разработки лесосек при наличии у исследователя соответствующего программного обеспечения.

В основу работы А.П. Соколова, Е.В. Осипова [30] заложено имитационное моделирование работы харвестера с использованием метода дискретно-событийного имитационного моделирования на сетях Петри. Авторы работы [31] с помощью компьютерного моделирования изучали эффективность сортиментной заготовки древесины на выборочных рубках. Они смоделировали временные элементы работы харвестера и форвардера, и их результаты показали, что производительность системы сбалансирована при работе в древостоях с диаметром ствола в среднем от 15 до 25 см.

В работе [32] смоделированы и симитированы затраты на сортиментную заготовку древесины с использованием пяти систем для заготовки небольших деревьев в естественных насаждениях и доказано, что компьютерное моделирование — это эффективный способ изучения затрат на лесозаготовки при различных сочетаниях древостоя и машин.

Однако вопрос учета природно-производственных факторов при работе харвестеров на выборочных рубках в настоящее время изучен не в полной мере, так как большинство из упомянутых исследований относится либо к конкретным регионам, либо к конкретным условиям древостоя, что обуславливает неполноту информации

о производственном процессе и стоимости систем сортиментной заготовки древесины для РФ. Не все полученные в ходе ранее проведенных имитационных исследований результаты представлены их разработчиками в виде математических зависимостей с возможностью их пересчета для других производственных условий без использования специализированных программных средств. Обоснованные на данный момент математические зависимости нацелены лишь на поиск производительности харвестера и не позволяют провести детальный анализ трудоемкости отдельных элементов технологического цикла его работы, зависящих от природно-производственных условий лесосек.

Цель работы

Цель работы — обоснование математических закономерностей работы харвестера, позволяющих с достаточным уровнем достоверности осуществлять быстрые технические расчеты производительности и трудозатрат при выполнении различных рубок леса.

Материалы и методы

С использованием функциональных возможностей системы имитационного моделирования AnyLogic создана модель работы харвестера на лесосеке. В ней реализован агентный подход при моделировании технологического процесса работы харвестера.

Имитационная модель прошла производственную апробацию и доказала свою адекватность на основе наблюдений за харвестером Silvatec 8266TH. Дальнейшее имитационное моделирование осуществлялось по итогам реальных производственных данных, собранных в ходе производственного эксперимента.

Для имитационного эксперимента был составлен четырехфакторный экспериментальный план с варьированием факторов на четырех уровнях в форме экспериментального плана типа 4^4 и реализован эксперимент с полным перебором вариантов. Анализируемые факторы учитывали возможность выполнения работ в разновозрастных древостоях при выполнении на лесосеках различных видов рубок.

Среди основных факторных признаков были приняты следующие:

Q — общий запас древесины на 1 га, $\text{м}^3/\text{га}$;

k_i — доля вырубаемого компонента по запасу древесины.

Показатель доли вырубаемого компонента по запасу древесины даст возможность проанализировать различные виды выборочных рубок. В частности, при равномерно постепенных и длительно постепенных рубках его значения



Рис. 1. Пример анализа отдельных элементов времени цикла работы харвестера на основе имитационного моделирования технологического процесса

Fig. 1. Example of analysis of individual elements of harvester cycle time on the basis of simulated service test of technological process

изменяются в пределах от 0,3 до 0,5, при добровольно выборочных рубках — от 0,15 до 0,4, в зависимости от интенсивности изреживания древостоя. При прореживаниях и проходных рубках данный показатель составляет от 0,15 до 0,5, при проходных рубках — от 0,2 до 0,4;

$K_{п}$ — количество крупного подлеска на 1 га, шт./га.

Под подлеском здесь понимаем следующие древесные породы: рябину обыкновенную, черемуху, иву и т. п. При анализе учитывались лишь деревья, ствол которых необходимо спиливать харвестером;

$V_{в}$ — объем хлыста вырубаемого компонента, м³.

В ходе имитационного моделирования весь технологический процесс работы харвестера в течение смены и последовательной обработки деревьев разбивался на ряд элементов времени цикла (рис. 1).

Для дальнейшего анализа использовались лишь показатели, зависящие от природных условий на лесосеке. На основе априорной информации можно предположить, что при обработке одного дерева выделенные для имитационного моделирования факторные признаки могут оказать наиболее значимое влияние на такие элементы времени работы харвестера, как перечисленные ниже:

$t_{н}$ — среднее время анализа оператором доступности вырубаемого дерева, устранения препятствий в виде крупного подлеска и наведения манипулятора на дерево, с;

$t_{п}$ — среднее время перемещения поваленного дерева в зону его последующей обработки с корректировкой и без корректировки рабочей позиции в процессе перемещения, с;

$t_{р.п}$ — среднее время перемещения между рабочими позициями, с.

Все остальные элементы времени цикла работы харвестера в течение смены, в частности, время маневров на погрузочном пункте, время перемещений на лесосеку и погрузочный пункт, время перерывов, время захвата дерева ножами харвестерной головки, спиливания и сталкивания его с пня, время обрезки сучьев, раскряжевки и откомлевки, либо вовсе не зависят от природных условий на лесосеке, либо не являются стохастическими величинами и подчиняются точным математическим и физическим зависимостям.

Значения параметров изменялись в диапазонах, представленных в табл. 1.

Рассмотрим пример имитационного эксперимента по анализу одночасовой производительности и трудозатрат на обработку деревьев харвестером в одной из фиксажных точек (рис. 2).

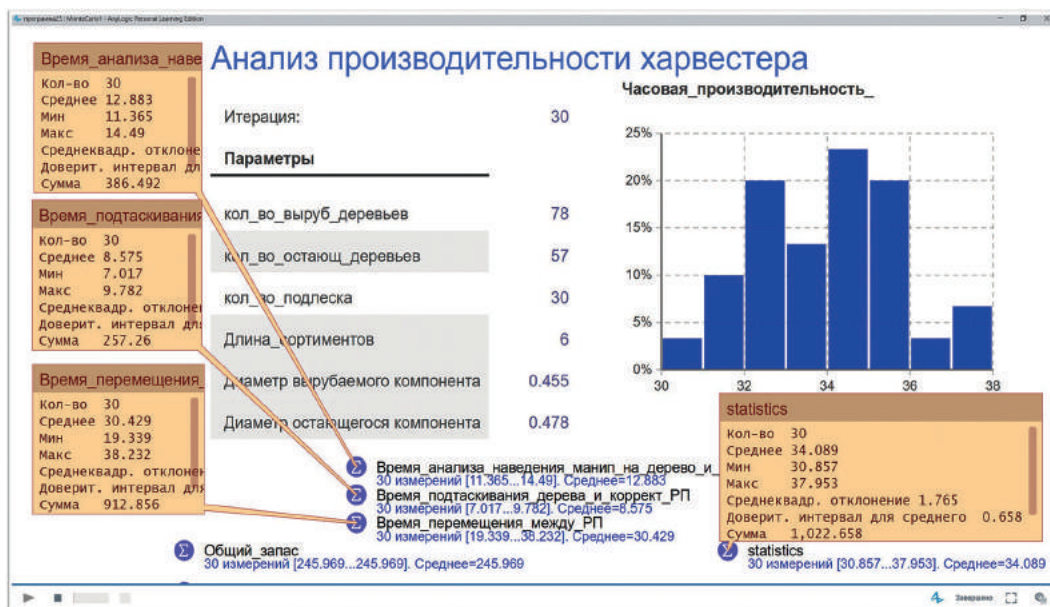


Рис. 2. Пример имитационного эксперимента работы харвестера в системе имитационного моделирования AnyLogic
 Fig. 2. Example of harvester simulated service test in AnyLogic simulation modelling system

Результаты и обсуждение

Полученные в ходе имитационного моделирования результаты прошли статистическую обработку, в результате которой предложена регрессионная зависимость для расчета средней одночасовой производительности харвестера в различных условиях лесосечных работ

$$\Pi_{ч} = \frac{\left(Q(a_1 + a_3 k_i + a_6 K_{п} + a_7 V_{в}) + k_i(a_2 + a_8 \cdot K_{п} + a_9 V_{в}) + K_{п}(a_3 + a_{10} V_{в}) + a_4 V_{в} + a_{11} Q^2 + a_{12} k_i^2 + a_{13} K_{п}^2 + a_{14} V_{в}^2 \right)}{Q k_i V_{в}^{a_{15}}},$$

где $a_1 - a_{15}$ — коэффициенты уравнения регрессии.

Получены результаты расчета коэффициентов уравнения регрессии и их доверительных интервалов (табл. 2). Табличные значения демонстрируют статистическую значимость всех коэффициентов.

Значения, полученные по регрессионной зависимости, совпали с результатами компьютерного эксперимента с доверительной вероятностью 0,95. Множественный коэффициент детерминации R^2 нелинейной модели составил 0,994.

Адекватность результатов, полученных с помощью регрессионной модели, ограничена использованием при ее построении диапазоном варьирования факторов. Выходящие за пределы этих диапазонов исходные данные не анализировались в рамках решения поставленной задачи, а следовательно, при значительном выходе

Т а б л и ц а 1

Диапазон изменения факторных признаков в ходе реализации имитационного моделирования работы харвестера
 Range of changes in factor attributes during the implementation of harvester simulated service test

| Показатель | Условное обозначение | Уровни варьирования | | | |
|---|----------------------|---------------------|-----|-----|-----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Общий запас древесины на 1 га, м ³ /га | Q | 50 | 120 | 190 | 260 |
| Доля вырубаемого компонента | k_i | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 1 |
| Количество подлеска на гектаре, шт./га | $K_{п}$ | 0 | 150 | 300 | 450 |
| Объем хлыста вырубаемого компонента, м ³ | $V_{в}$ | 0,2 | 0,7 | 1,2 | 1,7 |

за указанные пределы варьирования параметров исследователи могут получить близкие, но не всегда адекватные результаты.

Графическая демонстрация изменения производительности харвестера в различных природных условиях представлена на рис. 3. Объемные диаграммы построены по регрессионной модели путем попарного варьирования факторных признаков в указанных ранее диапазонах.

Анализ рис. 3, а свидетельствует о постепенном увеличении эффективности работы харвестера с ростом среднего объема хлыста на лесосеке. Уменьшение доли вырубаемого компонента приводит к снижению его производительности.

**Проверка статистической значимости коэффициентов уравнения регрессии
расчета одночасовой производительности харвестера**

Checking the statistical significance of the regression equation coefficients
for calculating the one-hour productivity of the harvester

| Коэффициент уравнения регрессии | Значение коэффициента | Стандартная ошибка | t-статистика | P-значение | Нижние границы доверительного интервала 95 % | Верхние границы доверительного интервала 95 % |
|---------------------------------|-----------------------|--------------------|--------------|------------|--|---|
| a_1 | -0,7397 | 0,1950 | -3,793 | 0,000 | -1,12436 | -0,35504 |
| a_2 | -149,422 | 48,9270 | -3,054 | 0,003 | -245,935 | -52,909 |
| a_3 | 0,153392 | 0,0513 | 2,992 | 0,003 | 0,052268 | 0,254516 |
| a_4 | -122,553 | 22,0370 | -5,561 | 0,000 | -166,023 | -79,083 |
| a_5 | 30,214 | 0,2266 | 133,332 | 0,000 | 29,7670 | 30,6610 |
| a_6 | -0,0028 | 0,0002 | -12,848 | 0,000 | -0,0032 | -0,0024 |
| a_7 | -0,79193 | 0,1326 | -5,974 | 0,000 | -1,05343 | -0,53043 |
| a_8 | -0,9281 | 0,0599 | -15,501 | 0,000 | -1,0463 | -0,8100 |
| a_9 | -252,608 | 37,0970 | -6,809 | 0,000 | -325,785 | -179,431 |
| a_{10} | 0,067226 | 0,0302 | 2,228 | 0,027 | 0,007696 | 0,126755 |
| a_{11} | 0,003926 | 0,0006 | 6,665 | 0,000 | 0,002764 | 0,005088 |
| a_{12} | 329,7531 | 35,9838 | 9,164 | 0,000 | 258,7717 | 400,7346 |
| a_{13} | 0,000248 | 0,0001 | 2,889 | 0,004 | 0,000079 | 0,000417 |
| a_{14} | 44,78558 | 12,4344 | 3,602 | 0,000 | 20,25753 | 69,31362 |
| a_{15} | -0,6966 | 0,0130 | -53,759 | 0,000 | -0,7222 | -0,6711 |

Комплексный анализ объемных диаграмм (рис. 3, а–в) показывает, что такая закономерность отчетливее проявляется при снижении ниже 40 % вырубке по запасу и менее очевидна при росте этого показателя. Диаграмма, представленная на рис. 3, б, свидетельствует о незначительном влиянии на производительность харвестера запаса древесины на 1 га при сплошных рубках на лесосеке, однако при переходе от анализа сплошных рубок к выборочным рубкам влияние общего запаса на 1 га на результаты его работы становится все более очевидным. Анализ следующих двух диаграмм (см. рис. 3, в, г) показывает степень влияния количества подлеска на выработку оператора и свидетельствует о вероятности снижения производительности до 5...25 % лишь благодаря этому факторному признаку. При этом, по аналогии с предыдущими выводами, наибольшие значения из этого диапазона характерны для выборочных рубок леса.

Наибольшее влияние на производительность харвестера оказывает средний объем хлыста на лесосеке, так как (см. рис. 3, а, г) снижение объема хлыста в исследуемом диапазоне приводит к сокращению производительности до 70 % относительно максимально зафиксированного показателя, в то время как влияние запаса древесины

на приведенных графиках ограничивается лишь 14 % (см. рис. 3, б), количества подлеска — 25 % (см. рис. 3, в), а доли вырубаемого компонента — 35 % (см. рис. 3, б–г).

Аналогично проведена статистическая обработка результатов наблюдений для отдельных элементов времени цикла, наиболее подверженных изменениям в различных природных условиях лесосек.

Использование исследователем в качестве результативного признака среднего времени анализа оператором харвестера доступности вырубемого дерева, устранения препятствий в виде крупного подлеска и наведения манипулятора на дерево позволило получить следующую регрессионную зависимость

$$t_n = \frac{\left(b_0 + Q(b_1 + b_4 k_i) + K_n(b_2 + b_5 k_i) + V_B(b_3 + b_6 K_n) + b_7 K_n^2 + b_8 V_B^2 \right)}{Q k_i V_B^{b_9}}$$

При этом множественный коэффициент детерминации R^2 составил 0,892.

Использование в качестве результативного признака среднего времени перемещения поваленного дерева в зону его последующей обработки с корректировкой и без корректировки рабочей позиции в процессе перемещения

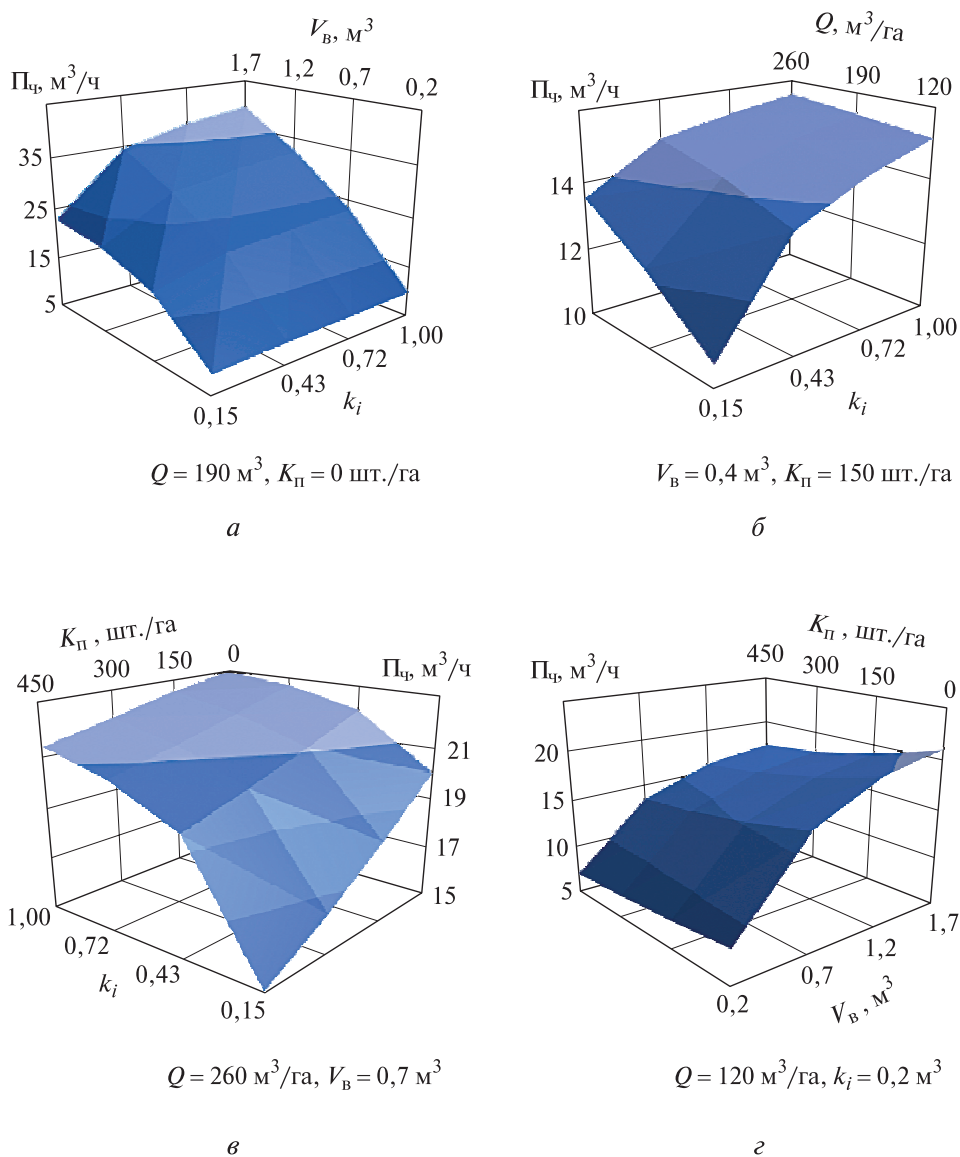


Рис. 3. Зависимость производительности харвестера от различных природных условий лесосеки: *а* — при изменении V_B и k_i с постоянными Q и K_n ; *б* — при изменении Q и k_i с постоянными V_B и K_n ; *в* — при изменении K_n и k_i с постоянными V_B и Q ; *г* — при изменении K_n и V_B с постоянными k_i и Q

Fig. 3. Dependence of harvester productivity on different natural conditions of the harvesting area: *a* — when V_B and k_i with constant Q and K_n ; *б* — when Q and k_i with constant V_B and K_n are changed; *в* — when K_n and k_i are changed with constant V_B and Q ; *г* — when K_n and V_B with constant k_i and Q are changed

позволило получить следующую регрессионную зависимость

$$t_{\text{пн}} = c_0 + Q(c_1 + c_5 k_i + c_6 K_n + c_7 V_B) + k_i(c_2 + c_9 V_B) + K_n(c_8 k_i + c_3) + V_B(c_4 + c_{10} K_n) + c_{11} k_i^2 + c_{12} K_n^2 + c_{13} V_B^2.$$

При этом множественный коэффициент детерминации R^2 составил 0,845.

Использование в качестве результативного признака среднего времени перемещения хар-

вестера между рабочими позициями в расчете на одно дерево позволило получить следующую регрессионную зависимость

$$t_{\text{пн}} = \frac{(d_0 + k_i(d_1 + d_3 Q + d_5 K_n) + K_n(d_2 + d_4 Q))}{Q k_i V_B^{d_6}}.$$

При этом множественный коэффициент детерминации R^2 составил 0,896.

Результаты расчета коэффициентов уравнения регрессии и их доверительных интервалов приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Проверка статистической значимости коэффициентов уравнения регрессии при обосновании среднего времени анализа доступности вырубаемого дерева, устранения препятствий и наведения манипулятора

Testing the statistical significance of the regression equation coefficients when justifying the average time for analysing the accessibility of the tree to be cut, removing obstacles and guiding the manipulator

| Коэффициент | Значение коэффициента | Стандартная ошибка | <i>t</i> -статистика | <i>P</i> -значение | Нижние границы доверительного интервала 95 % | Верхние границы доверительного интервала 95 % |
|-------------|-----------------------|--------------------|----------------------|--------------------|--|---|
| b_0 | -16,8924 | 6,6250 | -2,5498 | 0,0116 | -29,9587 | -3,8261 |
| b_1 | -0,6323 | 0,0507 | -12,4776 | 0,0000 | -0,7322 | -0,5323 |
| b_2 | 0,150539 | 0,038083 | 3,952918 | 0,0001 | 0,07543 | 0,2256 |
| b_3 | 42,82234 | 13,03726 | 3,28461 | 0,0012 | 17,1094 | 68,5353 |
| b_4 | 13,6398 | 0,1266 | 107,7202 | 0,0000 | 13,3900 | 13,8895 |
| b_5 | -0,17207 | 0,04196 | -4,10060 | 0,0001 | -0,2548 | -0,0893 |
| b_6 | 1,32378 | 0,02246 | 58,93521 | 0,0000 | 1,2795 | 1,3681 |
| b_7 | -0,00019 | 0,00007 | -2,71930 | 0,0071 | -0,0003 | -0,0001 |
| b_8 | -18,4956 | 7,2183 | -2,5623 | 0,0112 | -32,7320 | -4,2591 |
| b_9 | 0,021955 | 0,009065 | 2,421960 | 0,0164 | 0,0041 | 0,0398 |
| c_0 | 7,56201 | 0,32922 | 22,96954 | 0,0000 | 6,91262 | 8,21140 |
| c_1 | 0,015856 | 0,001895 | 8,365882 | 0,0000 | 0,012118 | 0,019595 |
| c_2 | 10,59971 | 0,73579 | 14,40581 | 0,0000 | 9,14834 | 12,05109 |
| c_3 | 0,007483 | 0,001009 | 7,418155 | 0,0000 | 0,005493 | 0,009473 |
| c_4 | -4,3837 | 0,3664 | -11,9640 | 0,0000 | -5,1065 | -3,6610 |
| c_5 | -0,00942 | 0,00180 | -5,22596 | 0,0000 | -0,01298 | -0,00587 |
| c_6 | -0,00001 | 0,00000 | -3,99362 | 0,0001 | -0,00002 | -0,00001 |
| c_7 | -0,00407 | 0,00132 | -3,09271 | 0,0023 | -0,00667 | -0,00148 |
| c_8 | 0,00794 | 0,00073 | 10,81634 | 0,0000 | 0,00649 | 0,00938 |
| c_9 | 2,572018 | 0,265061 | 9,703492 | 0,0000 | 2,049177 | 3,094858 |
| c_{10} | 0,002222 | 0,000465 | 4,782194 | 0,0000 | 0,001306 | 0,003139 |
| c_{11} | -9,4500 | 0,5136 | -18,3987 | 0,0000 | -10,4631 | -8,4369 |
| c_{12} | -0,000004 | 0,000002 | -2,59772 | 0,0101 | -0,000007 | -0,000001 |
| c_{13} | 1,045626 | 0,184137 | 5,678521 | 0,0000 | 0,682411 | 1,408841 |
| d_0 | 1474,823 | 13,849 | 106,495 | 0,0000 | 1447,512 | 1502,134 |
| d_1 | -305,263 | 40,764 | -7,489 | 0,0000 | -385,652 | -224,873 |
| d_2 | -0,28227 | 0,06518 | -4,33041 | 0,0000 | -0,411 | -0,154 |
| d_3 | 0,937587 | 0,248288 | 3,776211 | 0,0002 | 0,448 | 1,427 |
| d_4 | 0,001719 | 0,000332 | 5,183645 | 0,0000 | 0,001 | 0,002 |
| d_5 | 0,864121 | 0,129283 | 6,683950 | 0,0000 | 0,609 | 1,119 |
| d_6 | -0,893 | 0,007 | -126,354 | 0,0000 | -0,907 | -0,879 |

Зависимость изменения среднего времени анализа доступности вырубаемого дерева, устранения препятствий и наведения манипулятора в различных природных условиях лесосек представлена на рис. 4.

Анализ объемный диаграмм (рис. 4, а, в) показал, что при уменьшении процента выборки древесины по запасу увеличивается время анализа доступности вырубаемого дерева и наведения манипулятора, поскольку при сокращении доли вырубаемого компонента увеличивается количество препятствий на пути движения манипулятора в виде остающихся на дорастивание деревьев. При этом увеличивается

частота смены рабочих позиций, а следовательно, и времени на анализ ситуации и действия оператора при частых перемещениях машины. Траектория движения манипулятора идет в обход остающихся деревьев, что приводит к увеличению затрат времени при выполнении этой операции.

При меньшем среднем объеме хлыста на одной из двух сравниваемых лесосек и при одинаковом запасе леса на каждой из них количество деревьев будет больше на этой лесосеке, чем на другой. Таким образом, количество деревьев, обрабатываемых харвестером с одной рабочей позиции, тем больше, чем меньше средний объем

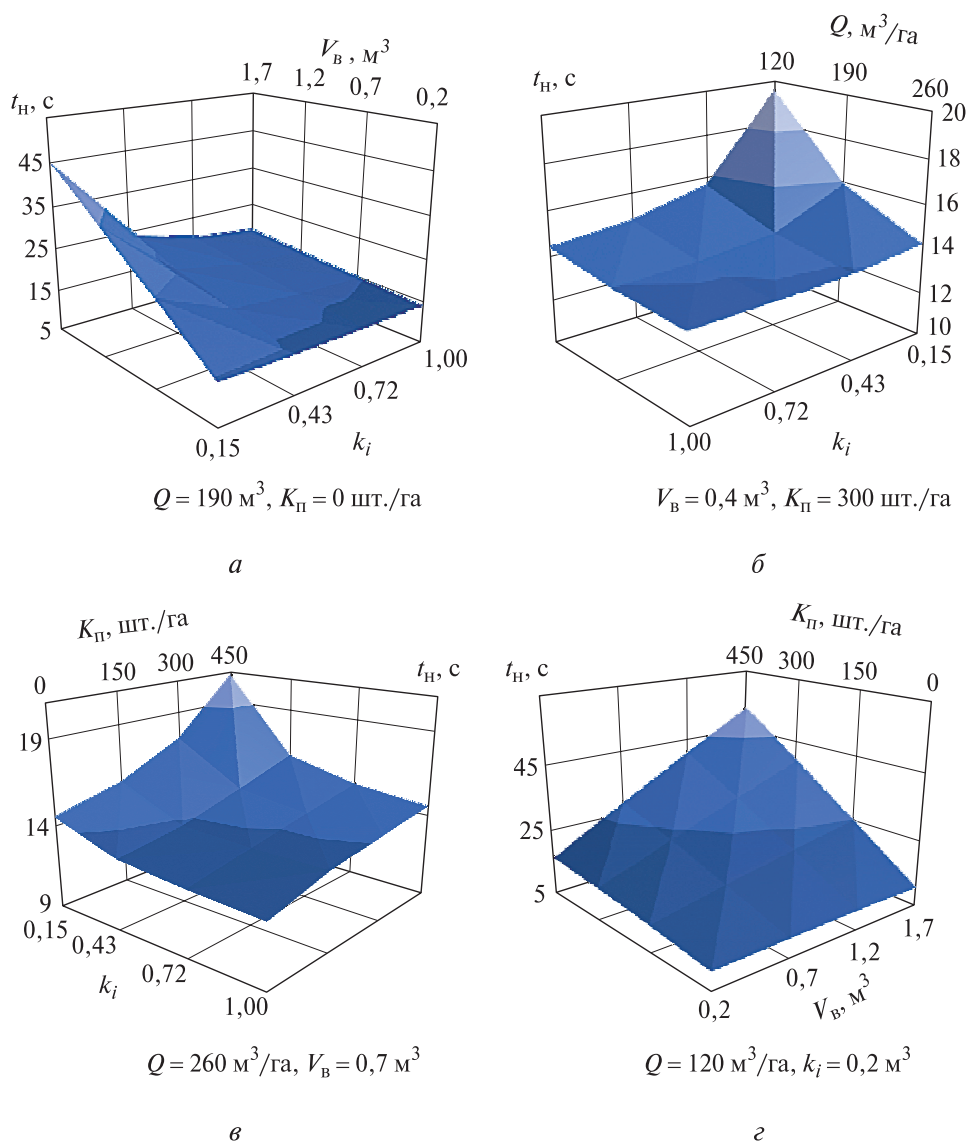


Рис. 4. Зависимость среднего времени анализа доступности вырубаемого дерева, устранения препятствий и наведения манипулятора от различных природных условий лесосек: а — при изменении V_b и k_i с постоянными Q и K_n ; б — при изменении Q и k_i с постоянными V_b и K_n ; в — при изменении K_n и k_i с постоянными V_b и Q ; г — при изменении K_n и V_b с постоянными k_i и Q

Fig. 4. Dependence of the average time of analysing the accessibility of the felled tree, removing obstacles and guiding the manipulator on different natural conditions of harvesting areas: а — when V_b and k_i with constant Q and K_n ; б — when Q and k_i with constant V_b and K_n ; в — when K_n and k_i with constant V_b and Q are changed; г — when K_n and V_b with constant k_i and Q are changed

хлыста на лесосеке (при прочих равных условиях). Также известно, что чем больше запас древесины на одной из двух сравниваемых лесосек при одинаковом среднем объеме хлыста на них, тем больше на ней деревьев. С учетом этих закономерностей, а также полученных результатов (см. рис. 4, а–г) можно утверждать, что чем больше деревьев оператор может обработать с одной рабочей позиции, тем меньшее влияние окажет доля вырубаемого компонента на анализируемый элемент времени цикла.

Анализ диаграмм (см. рис. 4, а, б) показал, что наибольший рост затрат времени фиксируется при выборочных рубках и вырубке менее 40 % запаса древесины на лесосеке.

Значительное увеличение искомого показателя фиксируется с повышением среднего объема хлыста на лесосеке (рис. 5, а, г), поскольку при малом объеме хлыста, а следовательно, большом количестве деревьев на участке в 1 га, значительный объем вырубке формируется за счет деревьев, произрастающих на волоках для обеспечения

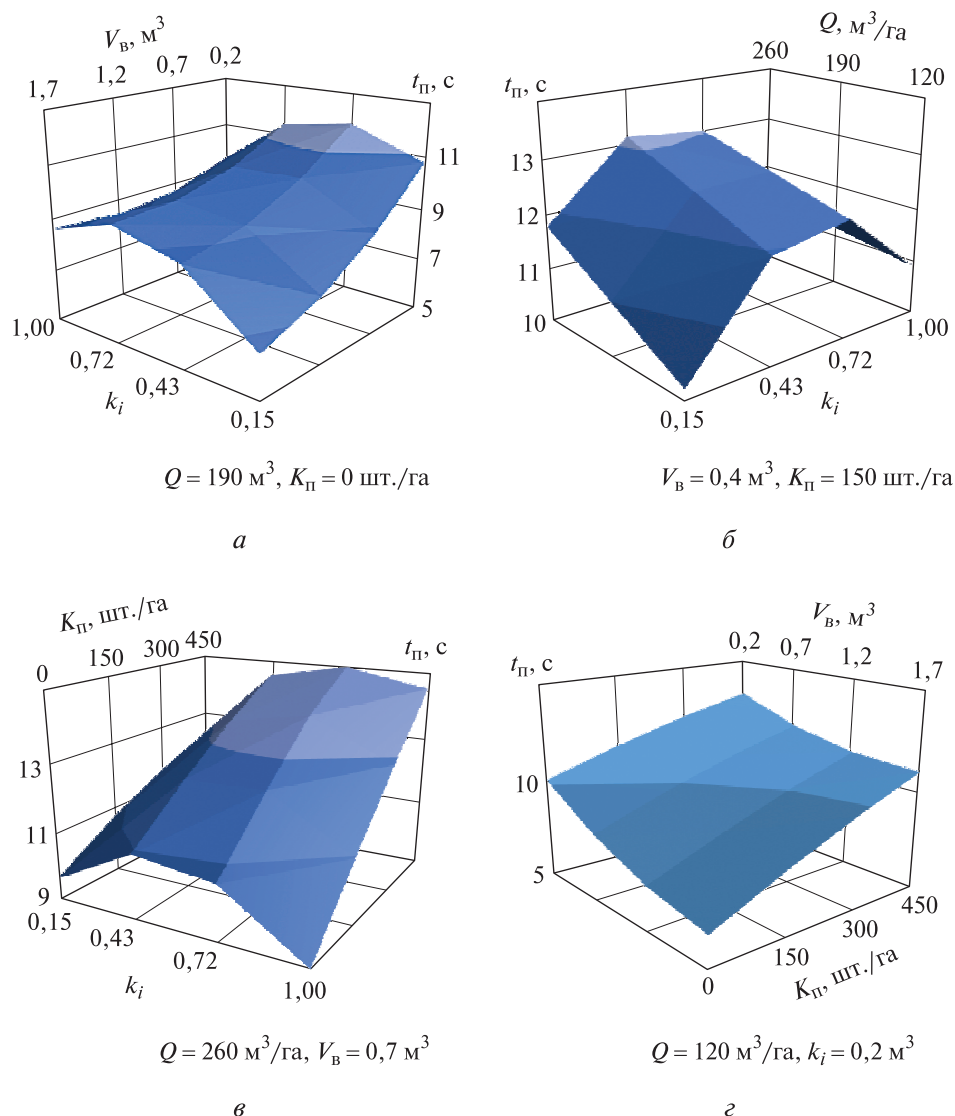


Рис. 5. Зависимость изменения среднего времени перемещения поваленного дерева в зону его последующей обработки от различных природных условий лесосек: *а* — при изменении $V_{\text{б}}$ и k_i с постоянными Q и $K_{\text{п}}$; *б* — при изменении Q и k_i с постоянными $V_{\text{б}}$ и $K_{\text{п}}$; *в* — при изменении $K_{\text{п}}$ и k_i с постоянными $V_{\text{б}}$ и Q ; *г* — при изменении $K_{\text{п}}$ и $V_{\text{б}}$ с постоянными k_i и Q

Fig. 5. Dependence of change in the average time of moving a fallen tree to the zone of its subsequent processing on different natural conditions of harvesting areas: *a* — when changing $V_{\text{б}}$ and k_i with constant Q and $K_{\text{п}}$; *б* — when changing Q and k_i with constant $V_{\text{б}}$ and $K_{\text{п}}$; *в* — when changing $K_{\text{п}}$ and k_i with constant $V_{\text{б}}$ and Q ; *г* — when changing $K_{\text{п}}$ and $V_{\text{б}}$ with constant k_i and Q

проезда лесосечных машин. Деревья, расположенные по пути движения харвестера, требуют минимальных затрат на наведение манипулятора, так как при сплошной рубке деревьев перед машиной отсутствуют затраты времени на анализ доступности, поиск выгодной рабочей позиции и отклонение траектории харвестерной головки от прямолинейной траектории в обход препятствий. В результате чем больше процент деревьев, вырубаемых с площади волока, тем меньше среднее значение анализируемого элемента времени цикла. При большом объеме хлыста и, как следствие, малом количестве деревьев на лесосеке, уменьшается количество деревьев, вырубаемых на волоке,

и повышается объем выборки по запасу за счет рубки деревьев с пасек. Деревья, произрастающие на пасеках, требуют больше затрат времени на анализ их доступности, устранение препятствий и наведение манипулятора. В результате этого сокращение количества деревьев на лесосеке приводит к увеличению среднего времени анализа доступности вырубаемого дерева, устранения препятствий и наведения манипулятора. Диаграммы на рис. 5, *в*, *г* демонстрируют увеличение трудозатрат с ростом количества крупного подлеска на лесосеке, вследствие дополнительных затрат времени на удаление препятствий по пути движения манипулятора в процессе его наведения на дерево.

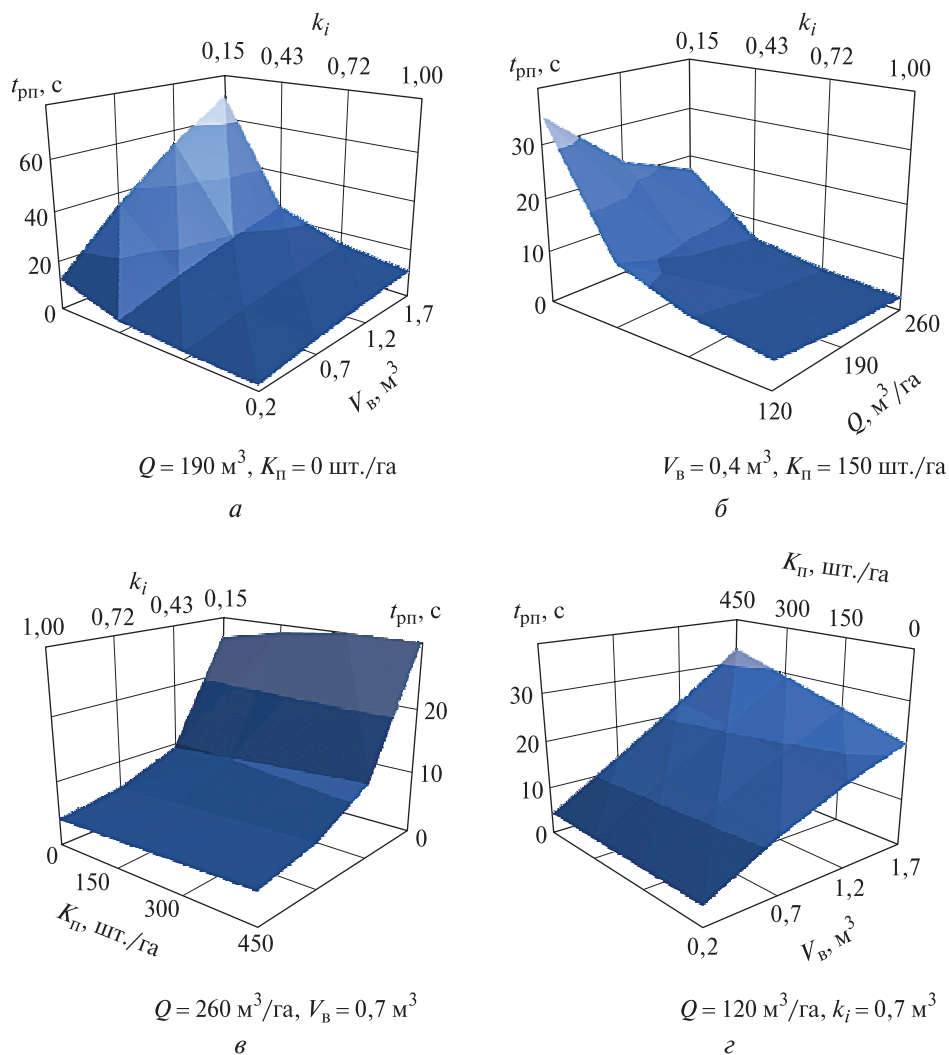


Рис. 6. Зависимость изменения среднего времени перемещения харвестера между рабочими позициями в расчете на одно дерево от различных природных условий лесосек: *а* — при изменении $V_в$ и k_i с постоянными Q и $K_п$; *б* — при изменении Q и k_i с постоянными $V_в$ и $K_п$; *в* — при изменении $K_п$ и k_i с постоянными $V_в$ и Q ; *г* — при изменении $K_п$ и $V_в$ с постоянными k_i и Q

Fig. 6. Dependence of change in the average time of harvester movement between working positions per tree on different natural conditions of the harvesting area: *a* — when $V_в$ and k_i are changed with constant Q and $K_п$; *б* — when Q and k_i are changed with constant $V_в$ and $K_п$; *в* — when $K_п$ and k_i are changed with constant $V_в$ and Q ; *г* — when $K_п$ and $V_в$ are changed with constant k_i and Q

Анализ диаграммы на рис. 6, *а* свидетельствует о постепенном снижении времени перемещения поваленного дерева в зону обработки при увеличении среднего объема хлыста на лесосеке, поскольку при принятой постоянной величине запаса древесины на 1 га, увеличение среднего объема хлыста при построении графика соответствует уменьшению количества деревьев на лесосеке. Сокращение числа деревьев повышает их доступность для беспрепятственного перемещения стволов в зону обработки без повреждений остающихся на доразбивание деревьев.

Выборочные рубки характеризуются повышенными трудозатратами на перемещение пова-

ленных стволов. Однако при этом, как видно из рис. 6, *а-в*, при выборке менее 40 % древесины по запасу, напротив, отмечается снижение времени на перемещение дерева, несмотря на рост числа оставляемых на доразбивание деревьев, поскольку при малой доле выборки древостоя увеличивается доля деревьев, поваленных на волоках, а доля деревьев, заготавливаемых на пасаках, сокращается. Рубка на волоках предусматривает 100%-е изъятие древесины с волока, а значит, деревья, поваленные на нем, подтаскиваются в зону обработки беспрепятственно и времени на их перемещение затрачивается меньше, чем при перемещении деревьев, поваленных на пасаках.

В результате среднее время перемещения поваленных деревьев при выборочных рубках с долей выборки менее 40 % сокращается.

Снижение времени перемещения стволов при 100%-м изъятии древесины в ходе сплошных рубок объясняется отсутствием препятствий на пути перемещения их в зону обработки (см. рис. 6, а–в).

Увеличение запаса древесины на 1 га при построении диаграмм сопровождается увеличением числа остающихся на дорастивание деревьев и приводит к усложнению процесса перемещения стволов без их повреждения и увеличению трудозатрат на эту операцию (см. рис. 6, б).

Увеличение количества подлеска на лесосеке не способствует снижению трудозатрат на перемещение поваленных деревьев (см. рис. 6, в, г), создавая препятствия при выполнении работ.

Анализ рис. 6, а показал постепенное увеличение среднего времени перемещения харвестера между рабочими позициями в расчете на одно спиленное дерево при увеличении среднего объема хлыста на лесосеке. Однако это увеличение времени оказывает наиболее значимое влияние на время работы машины лишь при выборочных рубках с выборкой менее 40 % по запасу.

Первоочередное влияние на анализируемый элемент времени цикла работы харвестера оказывает доля вырубемого компонента (см. рис. 6, б–г), так как снижение числа вырубемых деревьев приводит к увеличению времени общих перемещений харвестера по лесосеке при его вычислении в расчете на одно дерево.

Количественные показатели подлеска на лесосеке оказывают влияние на среднее время перемещения машины в расчете на одно дерево лишь при снижении доли выборки древесины и увеличении размерных характеристик назначенных в рубку древостоев (см. рис. 6, в, г). В подобных случаях, как показывают диаграммы, за счет увеличения количественных показателей подлеска на лесосеке, при прочих равных условиях, прирост трудозатрат может достигать 50 % от минимально зафиксированных при построении диаграмм результатах анализа.

Выводы

Полученные регрессионные модели позволяют проводить анализ эффективности работы харвестера в широком диапазоне изменения природных факторов.

Влияние на производительность харвестера оказывают преимущественно средний объем хлыста на лесосеке и доля вырубемого компонента. При этом нормирование труда невозможно без учета влияния таких природных факторов, как запас древесины на 1 га и количество крупного

подлеска на лесосеке. В отличие от среднего объема хлыста на лесосеке, влияние которого на производительность очевидно при любой степени изреживания древостоя, влияние запаса древесины на 1 га и количества крупного подлеска на лесосеке в наибольшей степени проявляется при реализации выборочных рубок леса. Это приводит к необходимости более тщательного анализа факторных признаков древостоя при нормировании труда в ходе выборочных рубок по сравнению со сплошными рубками. Наибольшее влияние запаса древесины на 1 га и количества крупного подлеска на лесосеке фиксируется при снижении доли выборки по запасу ниже 40 % и увеличивается по мере снижения этого значения.

Полученные регрессионные модели рекомендуются для анализа эффективности работы и нормирования труда при использовании харвестера Silvatec 8266TH, способствуют приближенному расчету искомых значений и дают исследователю общее представление об эффективности работы техники в конкретных природных условиях лесосек, что во многих случаях является достаточным для практических целей лесохозяйственных и лесозаготовительных предприятий.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 24-26-00129, <https://rscf.ru/project/24-26-00129/>

Список литературы


- [1] Куницкая О.А., Чернуцкий Н.А., Дербин М.В., Рудов С.Е., Григорьев И.В., Григорьева О.И. Машинная заготовка древесины по скандинавской технологии. СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2019. 192 с.
- [2] Мохирев А.П., Куницкая О.А., Калита Г.А., Вернер Н.Н., Швецова В.В. Оценка надежности лесозаготовительного харвестера // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 5. С. 93–101. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-5-93-101
- [3] Зырянов М.А., Салтанов А.Г., Давыденко А.Н. Основные тенденции развития конструкции лесозаготовительной техники в условиях совершенствования технологических процессов // Наука и бизнес: пути развития, 2021. № 5(119). С. 48–54.
- [4] Gellerstedt S., Dahlin B. Cut-to-length: The next decade // J. of Forest Engineering, 1999, no. 10(2), pp. 17–25.
- [5] Большаков Б.М., Андрушин М.И., Доронищева Е.В. Развитие технологий и машин при рубках ухода за лесом в Финляндии и Швеции // Лесохозяйственная информация, 2019. № 2. С. 111–128. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2019.2.11
- [6] Spinelli R., Owende P., Ward S.M. Productivity and cost of CTL harvesting of Eucalyptus globulus stands using excavator-based harvesters // For. Prod. J., 2002, no. 52(1), pp. 67–77.
- [7] Савиных Т.И., Савиных М.А., Якимович С.Б. Сравнительный анализ способов заготовки древесины харвестером по критерию производительности и удельной

- энергоёмкости // Леса России и хозяйство в них, 2021. № 4(79). С. 69–74. DOI 10.51318/FRET.2021.95.37.006
- [8] Савенков Д.А., Савенкова Н.В., Дербин М.В., Третьяков А.В. Метод ротационной замены пильных цепей как способ повышения производительности харвестера // Лесотехнический журнал, 2020. Т. 10. № 2(38). С. 196–203. DOI 10.34220/issn.2222-7962/2020.2/20
- [9] Chiorescu S., Gronlund A. Assessing the role of the harvester within the forestry-wood chain // For. Prod. J., 2001, no. 51(2), pp. 77–84.
- [10] Talbot B., Nordfjell T., Suadicani K. Assessing the utility of two integrated harvester-forwarder machine concepts through stand-level simulation // Int. J. For. Eng., 2003, no. 14(2), pp. 31–43.
- [11] Wester F., Eliasson L. Productivity in final felling and thinning for a combined harvester-forwarder (Harwarder) // Int. J. For. Eng., 2003, no. 14(2), pp. 45–50.
- [12] Conradie I., Greene W.D., Murphy G.E. Value recovery with harvesters in southeastern USA pine stands // Forest Products J., 2004, no. 54(12), pp. 80–84.
- [13] Greene W.D., Jackson B.D., Culpepper J.D. Georgia's logging businesses, 1987 to 1997 // For. Prod. J., 2001, no. 51(1), pp. 25–28.
- [14] Пискунов М.А. Компании-участники промышленной кооперации по изготовлению харвестеров и форвардеров: анализ первичной информации // Журнал естественнонаучных исследований, 2022. Т. 7. № 3. С. 48–52.
- [15] Пискунов М.А. Исследование стоимости харвестеров на вторичном рынке как аспекта изменения их технического состояния // Тракторы и сельхозмашины, 2020. № 5. С. 37–44. DOI 10.31992/0321-4443-2020-5-37-44
- [16] Mokhiev A.P. Method of selection of forest machines under the climatic conditions // Forestry Engineering J., 2016, t. 6, no. 4(24), pp. 208–215. DOI 10.12737/23459
- [17] Чайка О.Р., Журавлев В.В. Обоснование параметров технологического оборудования харвестеров для несплошных рубок леса // Ремонт. Восстановление. Модернизация, 2021. № 2. С. 39–40. DOI 10.31044/1684-2561-2021-0-2-39-40
- [18] Жук К.Д., Угрюмов С.А., Свойкин Ф.В., Свойкин В.Ф. Размерно-качественные характеристики круглых сортиментов, заготавливаемых с применением многооперационных лесных машин // ИзВУЗ Лесной журнал, 2022. № 5(389). С. 114–130.
- [19] Eliasson L. Simulation of thinning with a single-grip harvester // For. Sci., 1998, no. 45 (1), pp. 26–34.
- [20] Wang J., LeDoux C.B., Li Y. Simulating Cut-to-Length Harvesting Operations in Appalachian Hardwoods // International J. of Forest Engineering, 2005, v. 16, no. 2, pp. 11–27. DOI: <https://doi.org/10.1080/14942119.2005.10702510>
- [21] Чайка О.Р., Фокин Н.С. Алгоритм моделирования параметров лесных насаждений // Ремонт. Восстановление. Модернизация, 2018. № 12. С. 41–43. DOI 10.31044/1684-2561-2018-0-12-41-43
- [22] Черник Д.В., Казанцев Р.В. Имитационное физическое моделирование универсальной лесозаготовительной машины // Хвойные бореальной зоны, 2020. Т. 38. № 3–4. С. 183–188.
- [23] Ширнин Ю.А., Онучин Е.М. Имитационное моделирование движения многооперационной лесной машины // ИзВУЗ Лесной журнал, 2003. № 4. С. 66–72.
- [24] Чайка О.Р., Михеев К.П. Алгоритм моделирования захвата и срезания деревьев харвестером на несплошных рубках леса // Ремонт. Восстановление. Модернизация, 2019. № 12. С. 30–33. DOI 10.31044/1684-2561-2019-0-12-30-33
- [25] Sängstuvall L., Bergström D., Lämås T., Nordfjell T. Simulation of harvester productivity in selective and boom-corridor thinning of young forests // Scandinavian J. of Forest Research, 2012, v. 27, no. 1, pp. 56–73. <http://dx.doi.org/10.1080/02827581.2011.628335>
- [26] Wang J., LeDoux C.B. Estimating and validating ground-based timber harvesting production through computer simulation // For. Sci., 2003, no. 49(1), pp. 64–76.
- [27] Wang J., Greene W.D., Stokes B. Stand, harvest, and equipment interactions in simulated harvesting prescriptions // For. Prod. J., 1998, no. 48(9), pp. 81–86.
- [28] Aedo-Ortiz D.M., Olsen E.D., Kellogg L.D. Simulating a harvester-forwarder softwood thinning: A software evaluation // For. Prod. J., 1997, no. 47(5), pp. 36–41.
- [29] Суханов Ю.В., Селиверстов А.А., Соколов А.П., Сюнев В.С. Имитационное моделирование работы харвестера: алгоритмы и реализация // Ученые записки Петрозаводского государственного университета, 2012. № 8–2(129), С. 49–51.
- [30] Соколов А.П., Осипов Е.В. Обоснование технологии заготовки древесины с помощью имитационного моделирования на сетях Петри // Лесотехнический журнал, 2018. Т. 8. № 1(29). С. 111–119. DOI 10.12737/article_5ab0dfc0247508.69266095
- [31] McNeel J., Rutherford D. Modeling harvester-forwarder system performance in a selection harvest // J. For. Eng., 1994, no. 6(1), pp. 7–14.
- [32] Hartsough B.R., Zhang X., Fight R.D. Harvesting cost model for small trees in natural stands in the interior northwest // For. Prod. J., 2001, no. 51(4), pp. 54–60.

Сведения об авторах

Сергеева Татьяна Владиславовна — аспирант, ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», sergeeva2010t@mail.ru

Гилязова Татьяна Аркадьевна — аспирант, ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», tat-gilyazova@yandex.ru

Рукомойников Константин Павлович  — д-р техн. наук, проф. кафедры лесопромышленных и химических технологий института леса и природопользования, ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», rukomojnikovkp@volgatch.net

Поступила в редакцию 29.12.2023.

Одобрено после рецензирования 18.01.20243.

Принята к публикации 06.02.2024.

RESULTS OF HARVESTER SIMULATED SERVICE TEST DURING SELECTIVE LOGGING

T.V. Sergeeva, T.A. Gilyazova, K.P. Rukomoynikov✉

Volga State University of Technology, 3, Lenin Square, 424000, Yoshkar-Ola, Republic of Mari El, Russia

rukomojnikovkp@volgatech.net

The currently existing mathematical dependencies are aimed only at substantiating the productivity of harvesters and do not allow a detailed analysis of the complexity of individual elements of the cycle time depending on natural and industrial conditions. In this regard, the purpose of this study is to substantiate the mathematical patterns of harvester operation, which allow for rapid technical calculations of productivity and labor costs with a sufficient level of reliability when performing various logging operations. To achieve this goal, a simulation model of harvester operation in a logging area was created and experiments were conducted on this model. The results of statistical processing of simulation results are shown. Regression dependencies are proposed for calculating the average hourly productivity of a harvester, as well as for calculating individual elements of its cycle time, created as a result of analyzing the results of a study on a model. The regression dependences of calculating the average time of pointing the manipulator at a growing tree, moving a fallen tree to its processing zone and the average time of moving the harvester between working positions per sawn tree, which have scientific and practical novelty, are determined. It is proved that labor rationing is impossible without taking into account the influence of such indicators on these elements of time as the average volume of whiplash in the cutting area, the proportion of the component being cut down, the forest reserve per hectare and the amount of large undergrowth in the cutting area. Diagrams of changes in the values of cycle time elements in the conditions of a variety of natural and industrial conditions in various forest areas are shown. Based on the conclusions obtained in the article, practical and scientific recommendations have been developed that increase the efficiency of labor rationing in logging operations. The obtained regression models are recommended for analyzing work efficiency and labor rationing when using the Silvatec 8266TH harvester.

Keywords: simulation, logging, felling area, selective logging, statistical processing, regression dependence, cut-to-length harvesting

Suggested citation: Sergeeva T.V., Gilyazova T.A., Rukomoynikov K.P. *Rezultaty imitatsionnogo modelirovaniya raboty kharvestera pri vyborochnykh rubkakh lesa* [Results of harvester simulated service test during selective logging]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 2, pp. 136–149. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-136-149

References

- [1] Kunitskaya O.A., Chernutskiy N.A., Derbin M.V., Rudov S.E., Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I. *Mashinnaya zagotovka drevesiny po skandinavskoy tekhnologii* [Machine harvesting of wood according to Scandinavian technology]. St. Petersburg: Izdatel'sko-poligraficheskaya assotsiatsiya vysshikh uchebnykh zavedeniy [Publishing and Printing Association of Higher Educational Institutions], 2019, 192 p.
- [2] Mokhirev A.P., Kunitskaya O.A., Kalita G.A., Werner N.N., Shvetsova V.V. *Ocenka nadezhnosti lesozagotovitel'nogo harvestera* [Logging harvester reliability assessment] // *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 5, pp. 93–101. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-5-93-101
- [3] Zyryanov M.A., Saltanov A.G., Davydenko A.N. *Osnovnye tendentsii razvitiya konstruksii lesozagotovitel'noy tekhniki v usloviyakh sovershenstvovaniya tekhnologicheskikh protsessov* [Main trends in the design of forest machinery in conditions of improving technological processes]. *Nauka i biznes: puti razvitiya* [Science and business: development ways], 2021, no. 5(119), pp. 48–54.
- [4] Gellerstedt S., Dahlin B. Cut-to-length: The next decade. *J. of Forest Engineering*, 1999, no. 10(2), pp. 17–25.
- [5] Bol'shakov B.M., Andryushin M.I., Doronicheva E.V. *Razvitie tekhnologii i mashin pri rubkakh ukhoda za lesom v Finlyandii i Shvetsii* [The development of technology and machines when thinning the forest in Finland and Sweden]. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information], 2019, no. 2, pp. 111–128. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2019.2.11
- [6] Spinelli R., Owende P., Ward S.M. Productivity and cost of CTL harvesting of Eucalyptus globulus stands using excavator-based harvesters. *For. Prod. J.*, 2002, no. 52(1), pp. 67–77.
- [7] Savinykh T.I., Savinykh M.A., Yakimovich S.B. *Sravnitel'nyy analiz sposobov zagotovki drevesiny kharvesterom po kriteriyu proizvoditel'nosti i udel'noy energoemkosti* [Comparative analysis of methods of harvesting wood by harvester according to the criterion of productivity and specific energy intensity]. *Les Rossii i khozyaystvo v nikh* [Forests of Russia and economy in them], 2021, no. 4(79), pp. 69–74. DOI 10.51318/FRET.2021.95.37.006
- [8] Savenkov D.A., Savenkova N.V., Derbin M.V., Tret'yakov A.V. *Metod rotatsionnoy zameny pil'nykh tsepey kak sposob povysheniya proizvoditel'nosti kharvestera* [Rotary replacement of saw chains as a way to increase harvester productivity]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry engineering journal], 2020, v. 10, no. 2(38), pp. 196–203. DOI 10.34220/issn.2222-7962/2020.2/20
- [9] Chiorescu S., Gronlund A. Assessing the role of the harvester within the forestry-wood chain. *For. Prod. J.*, 2001, no. 51(2), pp. 77–84.
- [10] Talbot B., Nordfjell T., Suadicani K. Assessing the utility of two integrated harvester-forwarder machine concepts through stand-level simulation. *Int. J. For. Eng.*, 2003, no. 14(2), pp. 31–43.
- [11] Wester F., Eliasson L. Productivity in final felling and thinning for a combined harvester-forwarder (Harwarder). *Int. J. For. Eng.*, 2003, no. 14(2), pp. 45–50.
- [12] Conradie I., Greene W.D., Murphy G.E. Value recovery with harvesters in southeastern USA pine stands. *Forest Products J.*, 2004, no. 54(12), pp. 80–84.
- [13] Greene W.D., Jackson B.D., Culpepper J.D. Georgia's logging businesses, 1987 to 1997. *For. Prod. J.*, 2001, no. 51(1), pp. 25–28.

- [14] Piskunov M.A. *Kompanii-uchastniki promyshlennoy kooperatsii po izgotovleniyu kharvesterov i forvarderov: analiz pervichnoy informatsii* [Features of the harvesting and logging equipment market in Russia]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2020, no. 6 (378), pp. 132–147. DOI 10.37482/0536-1036-2020-6-132-147
- [15] Piskunov M.A. *Issledovanie stoimosti kharvesterov na vtorichnom rynke kak aspekta izmeneniya ikh tekhnicheskogo sostoyaniya* [Research on the price of harvesters in the secondary market as an aspect of changing their technical condition]. *Traktory i sel'khoz mashiny* [Tractors and agricultural machinery], 2020, no. 5, pp. 37–44. DOI 10.31992/0321-4443-2020-5-37-44
- [16] Mokhiev A.P. Method of selection of forest machines under the climatic conditions. *Forestry Engineering J.*, 2016, t. 6, no. 4(24), pp. 208–215. DOI 10.12737/23459
- [17] Chayka O.R., Zhuravlev V.V. *Obosnovanie parametrov tekhnologicheskogo oborudovaniya kharvesterov dlya nesploshnykh rubok lesa* [Justification of parameters of harvesters' technological equipment for non-final loggings]. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* [Repair, Reconditioning, Modernization], 2021, no. 2, pp. 39–40. DOI 10.31044/1684-2561-2021-0-2-39-40
- [18] Zhuk K.D., Ugryumov S.A., Svoikin F.V., Svoikin V.F. *Razmerno-kachestvennye kharakteristiki kruglykh sortimentov, zagotavlivaemykh s primeneniem mnogooperatsionnykh lesnykh mashin* [Dimension and quality specifications of round logs harvested with the use of multi-operational forest machines]. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 5(389), pp. 114–130. DOI 10.37482/0536-1036-2022-5-114-130
- [19] Eliasson L. Simulation of thinning with a single-grip harvester. *For. Sci.*, 1998, no. 45 (1), pp. 26–34.
- [20] Wang J., LeDoux C.B., Li Y. Simulating Cut-to-Length Harvesting Operations in Appalachian Hardwoods. *International J. of Forest Engineering*, 2005, v. 16, no. 2, pp. 11–27. DOI: <https://doi.org/10.1080/14942119.2005.10702510>
- [21] Chayka O.R., Fokin N.S. *Algoritm modelirovaniya parametrov lesnykh nasazhdeniy* [Simulation algorithm of parameters of forest plantations]. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* [Repair, Reconditioning, Modernization], 2018, no. 12, pp. 41–43. DOI 10.31044/1684-2561-2018-0-12-41-43
- [22] Chernik D.V., Kazantsev R.V. *Imitatsionnoe fizicheskoe modelirovanie universal'noy lesozagotovitel'noy mashiny* [Imitational physical modeling of a universal forestry machine]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Conifers of the boreal area], 2020, v. 38, no. 3–4, pp. 183–188.
- [23] Shirin Yu.A., Onuchin E.M. *Imitatsionnoe modelirovanie dvizheniya mnogooperatsionnoy lesnoy mashiny* [Simulation modeling of the movement of a multi-operational forest machine]. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2003, no. 4, pp. 66–72.
- [24] Chayka O.R., Mikheev K.P. *Algoritm modelirovaniya zakhvata i srezaniya derev'ev kharvesterom na nesploshnykh rubkakh lesa* [Simulation algorithm for gripping and cutting of trees by harvester in case of incompleting forest felling]. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* [Repair, Reconditioning, Modernization], 2019, no. 12, pp. 30–33. DOI 10.31044/1684-2561-2019-0-12-30-33
- [25] Sängstuvall L., Bergström D., Lämås T., Nordfjell T. Simulation of harvester productivity in selective and boom-corridor thinning of young forests. *Scandinavian J. of Forest Research*, 2012, v. 27, no. 1, pp. 56–73. <http://dx.doi.org/10.1080/02827581.2011.628335>
- [26] Wang J., LeDoux C.B. Estimating and validating ground-based timber harvesting production through computer simulation. *For. Sci.*, 2003, no. 49(1), pp. 64–76.
- [27] Wang J., Greene W.D., Stokes B. Stand, harvest, and equipment interactions in simulated harvesting prescriptions. *For. Prod. J.*, 1998, no. 48(9), pp. 81–86.
- [28] Aedo-Ortiz D.M., Olsen E.D., Kellogg L.D. Simulating a harvester-forwarder softwood thinning: A software evaluation. *For. Prod. J.*, 1997, no. 47(5), pp. 36–41.
- [29] Sukhanov Yu.V., Seliverstov A.A., Sokolov A.P., Syuney V.S. *Imitatsionnoe modelirovanie raboty kharvestera: algoritmy i realizatsiya* [Simulation modeling of harvester's work: algorithm and realization]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta* [Scientific notes of Petrozavodsk State University], 2012, no. 8–2(129), pp. 49–51.
- [30] Sokolov A.P., Osipov E.V. *Obosnovanie tekhnologii zagotovki drevesiny s pomoshch'yu imitatsionnogo modelirovaniya na setyakh Petri* [Substantiation of the technology of wood harvesting with the help of imitation modeling on petri net]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry engineering journal], 2018, v. 8, no. 1(29), pp. 111–119. DOI 10.12737/article_5ab0dfc0247508.69266095
- [31] McNeel J., Rutherford D. Modeling harvester-forwarder system performance in a selection harvest. *J. For. Eng.*, 1994, no. 6(1), pp. 7–14.
- [32] Hartsough B.R., Zhang X., Fight R.D. Harvesting cost model for small trees in natural stands in the interior northwest. *For. Prod. J.*, 2001, no. 51(4), pp. 54–60.

This work was financially supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-26-00129, <https://rscf.ru/project/24-26-00129/>

Authors' information

Sergeeva Tat'yana Vladislavovna — pg. of the Volga State University of Technology, sergeeva2010t@mail.ru

Gilyazova Tat'yana Arkad'evna — pg. of the Volga State University of Technology, tat-gilyazova@yandex.ru

Rukomoynikov Konstantin Pavlovich✉ — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Department of Forestry and chemical technologies of the Institute of forest and nature management, Volga State University of Technology, rukomojnikovkp@volgatech.net

Received 29.12.2023.

Approved after review 18.01.2024.

Accepted for publication 06.02.2024.

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

КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ Z-ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ ЭТАЛОННОЙ СИСТЕМЫ НЕЧЕТКИХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

О.М. Полещук

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

poleshchuk@mgul.ac.ru

Разработан алгоритм кластеризации данных, представленных лингвистическими Z-числами. Обе компоненты чисел (оценки объектов и их достоверность) являются значениями лингвистических переменных. Кластеризация информации осуществлялась на основе нечетких эталонных высказываний о важности характеристик объектов, формализованных на основе лингвистических переменных. Оценки объектов и нечеткие эталонные высказывания использованы для определения нечетких рейтинговых оценок степени принадлежности объектов к кластерам. Разработанный в статье алгоритм улучшает алгоритм кластеризации, представленный автором ранее, поскольку сохраняет больше исходной информации из-за нового подхода к формализации данных и уменьшает нечеткость рейтинговых оценок объектов, тем самым уменьшая риски ошибок в задачах поддержки принятия решений.

Ключевые слова: Z-информация, алгоритм кластеризации, рейтинговая оценка, лингвистическая переменная

Ссылка для цитирования: Полещук О.М. Кластерный анализ Z-информации на основе эталонной системы нечетких определений принадлежности // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 2. С. 150–155. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-150-155

Кластерный анализ является неотъемлемой частью аппарата обработки нечеткой информации (информации с нечеткими данными). Для формализации такой информации разработаны различные методы, в основе которых лежит понятие лингвистической переменной [1–6].

Одним из первых алгоритмов кластерного анализа нечетких данных был алгоритм нечеткой кластеризации *c*-средних (*c*-means) [7]. Этот алгоритм широко известен, часто используется и периодически улучшается, в том числе, в комбинации с другими алгоритмами. Так, например, в работе [8] этот алгоритм представлен в комбинации с генетическим алгоритмом, а в работах [9, 10] — улучшен в результате минимизации целевой функции с использованием алгоритма оптимизации роя частиц [11]. Новейшие модификации алгоритма нечеткой кластеризации *c*-средних представлены в работах [12, 13].

Для кластеризации нечетких данных разработаны алгоритмы на основе транзитивных нечетких отношений [14–20].

После определения Z-числа в 2011 г. профессором Лотфи Заде [21] и появления возможности учета достоверности информации с нечеткими данными, существующие алгоритмы кластеризации оказались непригодными для работы в новых условиях, поэтому возникла объективная необходимость в разработке алгоритмов

кластерного анализа Z-информации (информации с Z-числами).

В работе [22] представлен алгоритм нечеткой кластеризации, который объединяет преобразование Z-чисел в нечеткие числа и алгоритм нечеткой кластеризации *c*-средних. В работе [23] разработан алгоритм кластеризации Z-информации на основе системы нечетких правил вывода, а в работе [24] — на основе нечетких множеств второго типа. В работе [25] разработан кластерный алгоритм Z-информации на основе бинарных нечетких отношений, а в работе [26] — алгоритм на основе системы нечетких высказываний о принадлежности объектов к каждому из кластеров. В работе [26] нечеткие высказывания представлены в виде значений лингвистической переменной, а оценки объектов — в виде Z-чисел, которые трансформируются в агрегирующие интервалы для последующего кластерного анализа. В связи с этим возникает вопрос исключения потери информации в результате такой трансформации и необходимости разработки алгоритма, позволяющего этого избежать.

Цель работы

Цель работы — разработка алгоритма кластерного анализа Z-информации на основе эталонной системы нечетких определений принадлежности, позволяющего сохранить исходную информацию об объектах в процессе ее формализации и снизить нечеткость конечных результатов.

Основные понятия и определения

Лингвистической переменной называют систему $\{X, T(X), U, V, S\}$, где X — название переменной; $T(X) = \{X_l, l = 1, m\}$ — терм-множество переменной X , т. е. множество термов или названий лингвистических значений переменной X ; V — синтаксическое правило, порождающее названия значений лингвистической переменной X ; S — семантическое правило, которое ставит в соответствие каждому терму из множества $T(X)$ нечеткое подмножество универсального множества U [1].

Если множество U является подмножеством действительной прямой, то нечеткими формализациями термов являются нечеткие числа. Функции принадлежности нечетких чисел, соответствующих термам лингвистической переменной, определяются четырьмя параметрами, если используется нечеткое T -число $\tilde{A} = \{a_1, a_2, a_L, a_R\}$. Первые два параметра представляют собой абсциссы левой и правой вершин верхнего основания трапеции, а последние два параметра — длины левого и правого крыльев трапеции. Функции принадлежности нечетких чисел, соответствующих термам лингвистической переменной, определяются тремя параметрами, если используется треугольное нечеткое число $\tilde{A} = \{a, a_L, a_R\}$. Первый параметр — это абсцисса вершины треугольника, а последние два параметра — длины его левого и правого крыльев.

В работе [6] приведено определение агрегирующего отрезка $[c_1, c_2]$ для нечеткого числа $\tilde{A} = \{a_1, a_2, a_L, a_R\}$. [23]:

$$c_1 = \int_0^1 \frac{2a_1 - (1-\alpha)a_L}{2} 2\alpha d\alpha = a_1 - \frac{1}{6} a_L,$$

$$c_2 = \int_0^1 \frac{2a_2 - (1-\alpha)a_R}{2} 2\alpha d\alpha = a_2 - \frac{1}{6} a_R.$$

Z-числом называется упорядоченная пара нечетких чисел $Z = (\tilde{C}, \tilde{R})$, где число \tilde{R} достоверность (надежность) числа \tilde{C} [21].

Лингвистическим называется Z-число, компоненты которого являются значениями лингвистических переменных, т. е., если $Z = (\tilde{C}, \tilde{R})$ является лингвистическим Z-числом, то первое нечеткое число \tilde{C} равно одному из нечетких значений $\tilde{X}_l, l = 1, m$ некоторой лингвистической переменной X , а второе число \tilde{R} равно одному из нечетких значений $\tilde{R}_v, v = 1, V$ некоторой лингвистической переменной R .

В работе [27] представлено определение агрегирующего отрезка $[\delta_1, \delta_2]$ для Z-числа $Z = (\tilde{A}, \tilde{R})$, $\tilde{A} = \{c_1, c_2, c_L, c_R\}$, $\tilde{R} = \{r_1, r_2, r_L, r_R\}$,

$$\delta_1 = r_1 \left(c_1 - \frac{1}{6} c_L \right) - r_L \left(\frac{1}{6} c_1 - \frac{1}{12} c_L \right),$$

$$\delta_2 = r_2 \left(c_2 + \frac{1}{6} c_R \right) + r_R \left(\frac{1}{6} c_2 + \frac{1}{12} c_R \right).$$

Агрегирующие отрезки исходных Z-чисел использованы в работе [26] для построения алгоритма кластеризации.

Постановка задачи и ее решение

Предположим, что N объектов оцениваются в рамках характеристик X_1, X_2, \dots, X_k , при этом используются, соответственно, шкалы с уровнями $X_{il}, i = 1, k, l_i = 1, m_i$. Для оценок объектов известны степени их достоверности, которые определены нечетко в рамках лингвистической шкалы с уровнями $R_v, v = 1, V: R_1$ — «Не достоверно», R_2 — «Не очень достоверно», R_3 — «Достоверно», R_4 — «Очень достоверно», R_5 — «Абсолютно достоверно».

Для кластеризации объектов на основе полученных оценок характеристик X_1, X_2, \dots, X_k сформулирована эталонная система нечетких определений принадлежности объектов к P кластерам. В основе этой системы лежат нечеткие высказывания о важности характеристик объектов $X_i, i = 1, k$ для каждого из рассматриваемых кластеров. Для нечетких высказываний о важности характеристик объектов $X_i, i = 1, k$ использована лингвистическая шкала с уровнями «Абсолютно не важна», «Больше не важна, чем важна», «Не очень важна», «Больше важна, чем не важна», «Важна», «Очень важна».

Формализация всех используемых шкал для оценки объектов, достоверности этих оценок и важности характеристик выполнена на основе лингвистических переменных согласно методу работы [4].

Шкалы для оценки объектов в рамках характеристик $X_i, i = 1, k$ соответственно с уровнями $X_{il}, i = 1, k, l_i = 1, m_i$ формализованы с помощью лингвистических переменных со значениями $\tilde{X}_{il}, i = 1, k, l_i = 1, m_i$.

Достоверность оценок объектов формализована с помощью лингвистической переменной с термами $R_v, v = 1, 5: R_1$ — «Не достоверно», R_2 — «Не очень достоверно», R_3 — «Достоверно», R_4 — «Очень достоверно», R_5 — «Абсолютно достоверно» и соответствующими этим термам нечеткими числами $\tilde{R}_1 = (0, 0, 0, 25), \tilde{R}_2 = (0, 25, 0, 25, 0, 25), \tilde{R}_3 = (0, 5, 0, 25, 0, 25), \tilde{R}_4 = (0, 75, 0, 25, 0, 25), \tilde{R}_5 = (1, 0, 25, 0)$.

С помощью прямого опроса экспертов формализована лингвистическая шкала для оценки важности характеристик с термами «Абсолютно не важна», «Больше не важна, чем важна», «Не очень

важна», «Больше важна, чем не важна», «Важна», «Очень важна», которым в соответствие поставлены нечеткие числа $\tilde{C}_1, \tilde{C}_2, \dots, \tilde{C}_6$:

$$\begin{aligned} \tilde{C}_1 &= (0, 0, 0, 2), \tilde{C}_2 = (0, 2, 0, 2, 0, 2), \\ \tilde{C}_3 &= (0, 4, 0, 2, 0, 2), \tilde{C}_4 = (0, 6, 0, 2, 0, 2), \\ \tilde{C}_5 &= (0, 8, 0, 2, 0, 2), \tilde{C}_6 = (1, 0, 2, 0). \end{aligned}$$

Оценки объектов в рамках характеристик $X_i, i = 1, k$ формализованы с помощью лингвистических Z-чисел $Z_{ni} = (\tilde{X}_{ni}, \tilde{R}_{ni}), n = 1, N, i = 1, k$, обе компоненты которых являются значениями лингвистических переменных, описанных выше. Первая компонента $\tilde{X}_{ni} = (x_{ni}^1, x_{ni}^2, x_{ni}^L, x_{ni}^R), n = 1, N, i = 1, k$ равна одному из нечетких чисел $\tilde{X}_{li}, i = 1, k, l_i = 1, m_l$, вторая компонента $\tilde{R}_{ni} = (r_{ni}^1, r_{ni}^2, r_{ni}^L, r_{ni}^R), n = 1, N, i = 1, k$ равна одному из нечетких чисел $\tilde{R}_v, v = 1, V$.

Через $\tilde{C}_{pi} = (c_{pi}^1, c_{pi}^2, c_{pi}^L, c_{pi}^R), p = 1, P, i = 1, k$ обозначены нечеткие числа, которые формализуют степени важности характеристик $X_i, i = 1, k$ для p -го кластера. Каждое из чисел $\tilde{C}_{pi} = (c_{pi}^1, c_{pi}^2, c_{pi}^L, c_{pi}^R), p = 1, P, i = 1, k$ равно одному из чисел $\tilde{C}_1, \tilde{C}_2, \dots, \tilde{C}_6$:

С помощью объединения оценок объектов и степеней важности характеристик для каждого из кластеров получена информация по каждому из объектов в виде P совокупностей, каждая из которых соответствует определенному кластеру и состоит из k пар нечетких чисел (степени важности характеристик $X_i, i = 1, k$ для этого кластера) и Z-чисел (оценки объектов в рамках характеристика $X_i, i = 1, k$ с их достоверностью):

$$\begin{aligned} & \{(\tilde{C}_{p1}, Z_{n1}), (\tilde{C}_{p2}, Z_{n2}), \dots, (\tilde{C}_{pk}, Z_{nk})\} = \\ & = \{(\tilde{C}_{p1}, (\tilde{X}_{n1}, \tilde{R}_{n1})), (\tilde{C}_{p2}, (\tilde{X}_{n2}, \tilde{R}_{n2})), \dots, (\tilde{C}_{pk}, (\tilde{X}_{nk}, \tilde{R}_{nk}))\}, \\ & p = \overline{1, P}, n = \overline{1, N}. \end{aligned}$$

Агрегирующие отрезки $[\beta_1^{pi}, \beta_2^{pi}], p = 1, P, i = 1, k$ для нечетких чисел $\tilde{C}_{pi} = (c_{pi}^1, c_{pi}^2, c_{pi}^L, c_{pi}^R), p = 1, P, i = 1, k$ определены на основе работы [6] следующим образом:

$$\beta_1^{pi} = c_{pi}^1 - \frac{1}{6}c_{pi}^L, \beta_2^{pi} = c_{pi}^2 + \frac{1}{6}c_{pi}^R.$$

Агрегирующие отрезки $[\alpha_1^{ni}, \alpha_2^{ni}], n = 1, N, i = 1, k$ для нечетких чисел $\tilde{R}_{ni} = (r_{ni}^1, r_{ni}^2, r_{ni}^L, r_{ni}^R), n = 1, N, i = 1, k$ определены аналогично:

$$\alpha_1^{ni} = r_{ni}^1 - \frac{1}{6}r_{ni}^L, \alpha_2^{ni} = r_{ni}^2 + \frac{1}{6}r_{ni}^R.$$

Оценка для n -го объекта в рамках характеристики $X_i, i = 1, k$ определена в виде нечеткого числа

$$\begin{aligned} \tilde{A}_i^n &= (x_{ni}^1 \alpha_1^{ni}, x_{ni}^2 \alpha_2^{ni}, x_{ni}^L \alpha_1^{ni}, x_{ni}^R \alpha_2^{ni}), \\ n &= \overline{1, N}, i = \overline{1, k} \end{aligned}$$

Рейтинговая оценка для n -го объекта в рамках характеристик $X_i, i = 1, k$ определена в виде нечеткого числа

$$\begin{aligned} \tilde{A}^n &= \sum_{i=1}^k \tilde{A}_i^n = \\ &= \left(\sum_{i=1}^k x_{ni}^1 \alpha_1^{ni}, \sum_{i=1}^k x_{ni}^2 \alpha_2^{ni}, \sum_{i=1}^k x_{ni}^L \alpha_1^{ni}, \sum_{i=1}^k x_{ni}^R \alpha_2^{ni} \right), \\ n &= \overline{1, N}. \end{aligned}$$

Рейтинговая оценка принадлежности n -го объекта к p -му кластеру (в соответствии с эталонной системой нечетких определений) определена в виде нечеткого числа

$$\tilde{A}_p^n = \left(\sum_{i=1}^k x_{ni}^1 \alpha_1^{ni} \beta_1^{pi}, \sum_{i=1}^k x_{ni}^2 \alpha_2^{ni} \beta_2^{pi}, \sum_{i=1}^k x_{ni}^L \alpha_1^{ni} \beta_1^{pi}, \sum_{i=1}^k x_{ni}^R \alpha_2^{ni} \beta_2^{pi} \right), n = \overline{1, N}.$$

Объект с индексом l признан типичным представителем кластера с индексом p , если $\sup x_n: \mu_{A_p^n} = 1 \in A_p^l, \mu_{A_p^n}$ — функция принадлежности A_p^n . Степени принадлежности $\mu_p(n), n \neq l, n = 1, N$ других объектов к p -му кластеру найдены следующим образом:

$$\begin{aligned} \mu_p(n) &= \max \min_x (\mu_{A_p^l}(x), \mu_{A_p^n}(x)), \\ n &\neq l, n = \overline{1, N}. \end{aligned}$$

При определении рейтинговых оценок объектов, а также рейтинговых оценок принадлежности объектов к кластерам сохраняется больше исходной информации по сравнению с алгоритмом, представленным в работе [26], поскольку при формализации информации происходит трансформация Z-чисел не в отрезки, а в нечеткие числа на основе нечетких оценок объектов.

Пример. В работе [26] приведен пример, результаты которого сравним с результатами кластеризации по разработанному в настоящей статье алгоритму.

Рассмотрим три характеристики X_1, X_2, X_3 , оцениваемые у трех объектов в рамках шкал соответственно с уровнями:

$X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{21}, X_{22}, X_{23}, X_{24}, X_{31}, X_{32}, X_{33}$, которые формализованы с помощью следующих нечетких чисел:

$$\begin{aligned} \tilde{X}_{11} &= (0, 0, 1, 0, 0, 1), \tilde{X}_{12} = (0, 2, 0, 6, 0, 1, 0, 2), \\ \tilde{X}_{13} &= (0, 8, 1, 0, 2, 0), \tilde{X}_{21} = (0, 0, 0, 5, 0, 0, 1), \\ \tilde{X}_{22} &= (0, 1, 5, 0, 1, 5), \tilde{X}_{23} = (0, 3, 0, 7, 0, 1, 5, 0, 1), \end{aligned}$$

$$\tilde{X}_{24} = (0,9, 1, 0,2, 0), \quad \tilde{X}_{31} = (0, 0,2, 0, 0,2),$$

$$\tilde{X}_{32} = (0,4, 0,5, 0,2, 0,2), \quad \tilde{X}_{33} = (0,7, 1, 0,2, 0).$$

Оценки объектов получены с определенными уровнями достоверности, которые определены в рамках лингвистической шкалы с уровнями R_v , $v=1, \bar{V}$: R_1 — «Не достоверно», R_2 — «Не очень достоверно», R_3 — «Достоверно», R_4 — «Очень достоверно», R_5 — «Абсолютно достоверно». Уровням R_v , $v=1, \bar{V}$ в соответствие поставлены нечеткие числа $\tilde{R}_1 = (0, 0, 0,25)$, $\tilde{R}_2 = (0,25, 0,25, 0,25)$, $\tilde{R}_3 = (0,5, 0,25, 0,25)$, $\tilde{R}_4 = (0,75, 0,25, 0,25)$, $\tilde{R}_5 = (1, 0,25, 0)$.

Оценки объектов формализованы с помощью Z-чисел:

$$Z_{11} = (\tilde{X}_{12}, \tilde{R}_3), \quad Z_{12} = (\tilde{X}_{24}, \tilde{R}_5), \quad Z_{13} = (\tilde{X}_{32}, \tilde{R}_4),$$

$$Z_{21} = (\tilde{X}_{13}, \tilde{R}_5), \quad Z_{22} = (\tilde{X}_{21}, \tilde{R}_3), \quad Z_{23} = (\tilde{X}_{33}, \tilde{R}_2),$$

$$Z_{31} = (\tilde{X}_{11}, \tilde{R}_4), \quad Z_{32} = (\tilde{X}_{23}, \tilde{R}_5), \quad Z_{33} = (\tilde{X}_{32}, \tilde{R}_3).$$

Сформулированы эталонные высказывания о принадлежности объектов к трем кластерам: « X_1 очень важна, X_2 важна, X_3 больше важна, чем не важна», « X_1 важна, X_2 очень важна, X_3 больше важна, чем не важна», « X_1 больше важна, чем не важна, X_2 не очень важна, X_3 важна».

Найдены рейтинговые оценки объектов в рамках трех характеристик в соответствии с эталонной системой нечетких определений принадлежности:

$$\tilde{A}_1^1 = (0,848, 1,271, 0,207, 0,176),$$

$$\tilde{A}_1^2 = (0,812, 1,142, 0,202, 0,045),$$

$$\tilde{A}_1^3 = (0,291, 0,775, 0,045, 0,221),$$

$$\tilde{A}_2^1 = (1,127, 1,612, 0,145, 0,132),$$

$$\tilde{A}_2^2 = (0,704, 1,097, 0,182, 0,054),$$

$$\tilde{A}_2^3 = (0,419, 0,991, 0,109, 0,166),$$

$$\tilde{A}_3^1 = (0,596, 0,964, 0,208, 0,204),$$

$$\tilde{A}_3^2 = (0,552, 0,882, 0,142, 0,202),$$

$$\tilde{A}_3^3 = (0,248, 0,576, 0,024, 0,136).$$

Исходя из полученных результатов, имеем степени принадлежности $\mu_p(n)$, $n=1,3$, $p=1,3$ объектов к кластерам:

$$\mu_1(1) = 1; \mu_1(2) = 1; \mu_1(3) = 0,934; \mu_2(1) = 1;$$

$$\mu_2(2) = 0,614; \mu_2(3) = 0,753; \mu_3(1) = 1;$$

$$\mu_3(2) = 0,876; \mu_3(3) = 0,484.$$

В работе [26] с теми же исходными данными получены следующие результаты:

$$\tilde{A}_1^1 = (0,853, 1,316, 0,235, 0,354),$$

$$\tilde{A}_1^2 = (0,7940, 0,9545, 0,1757, 0,2273),$$

$$\tilde{A}_1^3 = (0,187, 0,807, 0,062, 0,229),$$

$$\tilde{A}_2^1 = (1,107, 1,617, 0,235, 0,354),$$

$$\tilde{A}_2^2 = (0,703, 0,917, 0,176, 0,227),$$

$$\tilde{A}_2^3 = (0,281, 1,062, 0,062, 0,229),$$

$$\tilde{A}_3^1 = (0,593, 0,947, 0,235, 0,354),$$

$$\tilde{A}_3^2 = (0,556, 0,737, 0,176, 0,227),$$

$$\tilde{A}_3^3 = (0,186, 0,603, 0,062, 0,227),$$

$$\mu_1(1) = 1; \mu_1(2) = 1; \mu_1(3) = 0,899; \mu_2(1) = 1;$$

$$\mu_2(2) = 0,588; \mu_2(3) = 0,905; \mu_3(1) = 1;$$

$$\mu_3(2) = 0,578; \mu_3(3) = 0,522.$$

Окончательные результаты кластерного анализа настоящей работы и работы [26] совпадают, но рейтинговые оценки объектов, имеют меньше нечеткости (нечеткие числа, формализующие оценки, имеют меньшие значения третьего и четвертого параметров), а поэтому распознаются с меньшим риском ошибок, что играет существенную роль при решении задач поддержки принятия решений.

Выводы

Алгоритмы кластеризации нечеткой информации, поступающей для дальнейшего анализа с определенной степенью достоверности, актуальны и востребованы, но не разработаны в должной степени для решения задач поддержки принятия решений в нечеткой среде.

Разработанный в статье алгоритм кластерного анализа Z-информации на основе эталонной системы нечетких определений принадлежности объектов к кластерам позволяет сохранить исходную информацию об объектах в процессе ее формализации и снизить нечеткость конечных результатов.

Для кластеризации оценки объектов формализованы в виде лингвистических Z-чисел, обе компоненты которых (сами оценки и степени их достоверности) являются значениями лингвистических переменных. Эталонная система нечетких определений принадлежности также формализована на основе лингвистической переменной. Формализации использованы для определения рейтинговых оценок принадлежности объектов к кластерам, которые представлены в виде нечетких чисел.

Работа алгоритма показана на примере. Проведен сравнительный анализ полученных результатов и результатов ранее разработанного алгоритма.

Представленный в статье алгоритм улучшает алгоритм кластеризации, представленный автором ранее, поскольку сохраняет больше исходной информации из-за нового подхода к формализации данных и уменьшает нечеткость рейтинговых оценок объектов, тем самым уменьшая риски ошибок в задачах поддержки принятия решений.

Список литературы / References

- [1] Zadeh L.A. Fuzzy logic and approximate reasoning // *Synthese*, 1975, v. 80, pp. 407–428.
- [2] Hwang C.L., Lin N.J. Group decision making under multiple criteria. Berlin: Springer, 1987, 400 p.
- [3] Borisov A.N., Krumberg O.A., Fedorov I.P. Decision making on the basis of fuzzy models: Examples of use. Riga: Zinatne, 1990, 184 p.
- [4] Poleshchuk O., Komarov E. Expert Fuzzy Information Processing. Studies in Fuzziness and Soft Computing, 2011, v. 268, pp. 1–239.
- [5] Ryjov A. Fuzzy Linguistic Scales: Definition, Properties and Applications. In: Reznik L., Kreinovich V. (eds) *Soft Computing in Measurement and Information Acquisition. Studies in Fuzziness and Soft Computing*, 2003, v. 127.
- [6] Poleshchuk O.M. Creation of linguistic scales for expert evaluation of parameters of complex objects based on semantic scopes // *International Russian Automation Conference (RusAutoCon – 2018)*, 2018, pp. 1–6.
- [7] Bezdek J.C. Selected applications in classifier design // *Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms*, 1981, v. 2, pp. 203–239.
- [8] Bezdek J.C., Hathaway R.J. Optimization of fuzzy clustering criteria using genetic algorithm // *Proceedings of the IEEE Conference on Evolutionary Computation*, 1994, v. 2, pp. 589–594.
- [9] Runkler T.A., Katz C. Fuzzy clustering by particle swarm optimization // *Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, 2006, pp. 34–41.
- [10] Liu H.C., Yih J.M., Wu D.B., Liu S.W.: Fuzzy C-mean clustering algorithms based on Picard iteration and particle swarm optimization // *Proceedings of the International Workshop on Geoscience and Remote Sensing (ETT and GRS-2008)*, 2008, pp. 75–84.
- [11] Kennedy J., Eberhart R.C. Particle swarm optimization // *Proceedings of the IEEE International Joint Conference on Neural Networks*, 1995, v. 4, pp. 1942–1948.
- [12] Chen M., Ludwig A. Particle swarm optimization based fuzzy clustering approach to identify optimal number of clusters // *J. of Artificial Intelligence and Soft Computing Research*, 2014, v. 4, no. 1, pp. 43–56.
- [13] Phyo O., Chaw E.: Comparative Study of Fuzzy PSO (FPSO) Clustering Algorithm and Fuzzy C-Means (FCM) Clustering Algorithm // *National J. of Parallel and Soft Computing*, 2019, v. 1, no. 1, pp. 62–67.
- [14] Ruspini E.H. Numerical methods for fuzzy clustering // *Information Sciences*, 1970, v. 2, pp. 319–350.
- [15] Tamura S., Higuchi S., Tanaka K. Pattern classification based on fuzzy relations // *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1971, v. 1, pp. 61–66.
- [16] Zadeh L.A.: Similarity relations and fuzzy orderings // *Information Sciences*, 1971, v. 3, pp. 177–200.
- [17] Dunn J.C. A fuzzy relative of the ISODATA process and its use in detecting compact well-separated clusters // *J. of Cybernetics*, 1973, v. 3, pp. 32–57.
- [18] Poleshchuk O., Komarov E. The determination of rating points of objects with qualitative characteristics and their usage in decision making problems // *International J. of Computational and Mathematical Sciences*, 2009, v. 3, no. 7, pp. 360–364.
- [19] Darwish A., Poleshchuk O. New models for monitoring and clustering of the state of plant species based on semantic spaces // *J. of Intelligent and Fuzzy Systems*, 2014, v. 3, no. 26, pp. 1089–1094.
- [20] Poleshchuk O.M., Komarov E.G., Darwish A. Assessment of the state of plant species in urban environment based on fuzzy information of the expert group // *Proceedings of the XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, (SCM-2017)*, 2017, pp. 651–654.
- [21] Zadeh L.A. A Note on Z-numbers // *Information Sciences*, 2011, v. 14, no. 181, pp. 2923–2932.
- [22] Jamal M., Khalif K., Mohamad S. The implementation of Z-numbers in fuzzy clustering algorithm for wellness of chronic kidney disease patients // *J. of Physics: Conference Series*, 2018, v. 1366, p. 012058.
- [23] Aliev R.A., Pedrycz W., Guirimov B.G., Huseynov O.H. Clustering method for production of Z-numbers based if-then rules // *Information Sciences*, 2020, v. 520, pp. 155–176.
- [24] Aliev R., Guirimov B. Z-number clustering based on general Type-II fuzzy sets // *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2018, v. 896, pp. 270–278.
- [25] Полещук О.М. Кластерный анализ экспертной информации на основе Z-чисел // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2022. Т. 26. № 1. С. 143–148. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-1-143-148
Poleshchuk O.M. *Klasternyy analiz ekspertnoy informatsii na osnove Z-chisel* [Cluster analysis of expert information based on Z-numbers]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 1, pp. 143–148. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-1-143-148
- [26] Poleshchuk O. Clustering Z-information based on a system of fuzzy reference requirements // *E3S Web of Conferences*, 2023, v. 420, p. 06022.
- [27] Poleshchuk O.M. Expert group information formalization based on Z-numbers // *J. of Physics: Conference Series*, 2020, v. 1703, p. 012010.

Сведения об авторе

Полещук Ольга Митрофановна — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Высшая математика и физика», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), poleshchuk@mgul.ac.ru

Поступила в редакцию 07.11.2023.

Одобрено после рецензирования 20.12.2023.

Принята к публикации 06.02.2024.

CLUSTER ANALYSIS OF Z-INFORMATION BASED ON A REFERENCE SYSTEM OF FUZZY IDENTIFICATION

O.M. Poleshchuk

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

poleshchuk@mgul.ac.ru

The paper develops an algorithm for clustering Z-information based on reference fuzzy identification of objects belonging to clusters. The information is represented by linguistic Z-numbers, both components of which (object evaluation and their validity) are values of linguistic variables. Reference fuzzy identification of affiliation is based on information about the importance of the characteristics assessed by objects, formalized on the basis of a linguistic variable. The object evaluation and fuzzy reference identification were used to determine fuzzy rankings of the degree to which objects belong to clusters. The algorithm developed in the article improves the clustering algorithm presented by the author earlier, since it preserves more initial information due to a new approach to data formalization and reduces the fuzziness of rating objects, thereby reducing the risks of errors in decision support tasks.

Keywords: Z-information, clustering algorithm, rating estimate, linguistic variable

Suggested citation: Poleshchuk O.M. *Klasternyy analiz Z-informatsii na osnove etalonnoy sistemy nechetkikh opredeleniy prinadlezhnosti* [Cluster analysis of Z-information based on a reference system of fuzzy identification]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 2, pp. 150–155. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-150-155

Author's information

Poleshchuk Ol'ga Mitrofanovna — Dr. Sci. (Tech.), Professor, Head of Higher Mathematics and Physics Department, of the BMSTU (Mytishchi branch) poleshchuk@mgul.ac.ru

Received 07.11.2023.

Approved after review 20.12.2023.

Accepted for publication 06.02.2024.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ ПРИ АНАЛИЗЕ КОНВЕРСИОННО-ОБЪЕМНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ФИТОМАССЫ ОЛЬХИ В ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ГРАДИЕНТАХ ЕВРАЗИИ

В.А. Усольцев^{1, 2✉}, И.С. Цепордей², А.А. Карабан^{3, 4},
С.В. Третьяков^{3, 4}, С.В. Коптев^{3, 4}, А.А. Парамонов³

¹ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», Россия, 620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, д. 37

²ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук» (Ботанический сад УрО РАН), Россия, 620144, Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 202А

³ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства», Россия, 163062, Архангельск, ул. Никитова, д. 13

⁴ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), 163002, Россия, г. Архангельск, Набережная Северной Двины, д. 17

Usoltsev50@mail.ru

Поскольку использование всеобщих аллометрических моделей фитомассы деревьев в конкретных географических условиях приводит к существенным смещениям, вызванным региональными географически обусловленными климатическими особенностями, в статье поставлена цель проанализировать изменение конверсионно-объемных коэффициентов фитомассы на примере древостоев ольхи в географических градиентах Евразии. Конверсионно-объемный коэффициент представляет собой отношение фитомассы той или иной фракции в абсолютно сухом состоянии к объему стволовой древесины в свежем состоянии. Основу исследования составила авторская база данных в количестве 170 пробных площадей для фракций надземной фитомассы и 75 для фитомассы корней. Предложена статистически значимая регрессионная модель конверсионно-объемных коэффициентов, включающая в себя в качестве независимых переменных возраст древостоя, географическую широту и географическую долготу и объясняющая от 24 до 68 % изменчивости конверсионно-объемных коэффициентов той или иной фракции фитомассы. Установлено, что в направлении с юга на север названные коэффициенты для фракций надземной фитомассы увеличиваются и для массы корней снижаются, а в направлении с запада на восток в пределах ареала ольхи коэффициенты для фракций надземной фитомассы снижаются и для массы корней увеличиваются. Предложенные модели предназначены для оценки фитомассы древостоев ольхи по известным значениям возраста и запаса стволовой древесины. В отличие от ранее опубликованных моделей, предложенные модели дифференцированы по географическим координатам широты и долготы.

Ключевые слова: *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn., *A. incana* (L.) Moench, конверсионно-объемные коэффициенты фитомассы, географические градиенты, регрессионные модели

Ссылка для цитирования: Усольцев В.А., Цепордей И.С., Карабан А.А., Третьяков С.В., Коптев С.В., Парамонов А.А. Использование регрессионной модели при анализе конверсионно-объемных коэффициентов фитомассы ольхи в географических градиентах Евразии // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 2. С. 156–165. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-156-165

Изменение климата оказывает негативное воздействие на планетарную биоту и здоровье человека и составляет серьезную экологическую проблему глобального уровня [1–3]. Лесные экосистемы участвуют в глобальном круговороте углерода, поглощают из атмосферы значительное количество парниковых газов и способствуют стабилизации климата [4–6]. Для оценки углерододепонирующей способности лесов предлагаются аллометрические модели фитомассы деревьев. Исследование ошибок всеобщих моделей фитомассы деревьев показало, что их использование в конкретных географических условиях приводит к существенным смещениям, вызванным региональными географически обусловленными

климатическими особенностями. Включение в модели географически обусловленных переменных значительно повышает точность оценок фитомассы деревьев и древостоев [7–9].

Данных о фитомассе лесов вследствие трудоемкости их экспериментального получения несопоставимо меньше по сравнению с накопленными в разных регионах сведениями о запасах стволовой древесины, регистрируемых в процессе лесоинвентаризации [8, 10]. Одним из приемлемых путей для заполнения информационных «белых пятен» по фитомассе является использование специальных коэффициентов перевода запаса стволовой древесины в фитомассу древостоя, представляющих отношение фитомассы той или иной фракции к запасу стволовой древесины [9, 11, 12]. В зарубежной литературе они получили распространение

вначале как «Biomass Expansion Factors (BEFs)» [15], а в последние годы все чаще используются как «Biomass Conversion and Expansion Factors (BCEFs)» [9]. В русскоязычной литературе предложен аналог этого термина — «конверсионно-объемные коэффициенты (КОК)» [11].

В литературе предлагалось использование КОК как средних значений для той или иной породы [13, 14] или как значений, связанных с возрастом древостоев [15, 16], их запасом [16–18], а также со средними значениями высоты и диаметра ствола [19, 20].

Предложены также модели зависимости КОК от совокупности таксационных показателей — возраста, густоты, запаса, средней высоты, среднего диаметра и класса бонитета [21–25]. Однако применительно к условиям России они совместимы с лесостроительными материалами повышенной таксации, но не со сводными данными государственного учета лесного фонда, что осложняет их использование при оценке фитомассы лесопокрытых площадей [12].

По материалам базы данных для лесообразующих пород Евразии, включающей в себя 1011 пробных площадей, была исследована зависимость КОК от возраста древостоя [11, 12]. Для пород с наибольшим количеством фактических данных — сосны, ели, лиственницы, березы — указанная зависимость была рассчитана отдельно по трем подзонам: 1) лесотундре и северной тайге, 2) средней тайге и 3) южной тайге, и зонам широколиственных лесов, лесостепи. Однако какая-либо закономерность в изменении КОК перечисленных четырех пород в широтно-зональном градиенте не установлена. Что касается мелколиственных пород, общая для всех широтных полос зависимость рассчитана только для осины и для группы «прочие мягколиственные породы» (по 26 пробным площадям), в которую вошла и ольха [11, 12].

Позднее для основных лесообразующих пород Евразии, по данным более 8 тыс. пробных площадей, рассчитаны модели КОК в зависимости от возраста, относительной полноты и класса бонитета древостоев [26]. Если в моделях КОК Д.Г. Замолодчикова и соавт. [11, 12] отсутствовала связь КОК с широтной зональностью, то в данном случае, когда в модели для указанных четырех пород дополнительно к возрасту древостоев в качестве независимых переменных были введены относительная полнота и класс бонитета, увеличение КОК в направлении с юга на север стало очевидным, причем как для надземной фитомассы, так и для корней [26].

Для ольхи серой и черной были рассчитаны модели КОК без разделения их по широтным зонам вследствие сравнительно малого количества

исходных данных: для ольхи серой — 63 и 35 пробных площадей, для ольхи черной — 90 и 35 пробных площадей соответственно для надземной фитомассы и корней. При этом коэффициенты детерминации моделей составили для стволов, ветвей, листвы и корней соответственно 0,18; 0,33; 0,72 и 0,44 у ольхи серой и 0,15; 0,14; 0,54 и 0,44 у ольхи черной [26].

Ольха является сравнительно продуктивной породой. Даже в относительно спелом возрасте среднегодовой прирост древостоев ольхи серой на 17 % выше, чем у осины [27], и в лучших условиях произрастания может достигать годичной продукции до 17 т на 1 га [28]. При рубке ольхи серой в возрасте 15...20 лет можно получить вдвое больше древесины с 1 га, чем при рубке осины и березы в соответствующем возрасте [29]. Благодаря способности производить большое количество фитомассы за короткий промежуток времени ольху можно рассматривать как перспективную древесную породу для ведения лесного хозяйства в целях повышения углерододепонирующей способности лесов, поэтому важное значение имеет создание модели КОК древостоев ольхи для оценки ее фитомассы в различных географических регионах Евразии, в том числе России, по показателям возраста и запаса стволовой древесины, регистрируемым в процессе лесоинвентаризации.

Цель работы

Цель работы — моделирование КОК фитомассы ольхи в географических градиентах Евразии.

Объекты и методы исследования

Последняя дополненная версия базы данных о фитомассе лесообразующих пород Евразии [30] позволила исследовать зависимость КОК древостоев от их возраста в географических градиентах не только в широтных, но и долготных. Если широтный градиент опосредует снижение температуры в северном направлении, то долготный — во многом обуславливает снижение осадков по мере повышения континентальности климата в направлении от океанического побережья в глубь континента [31].

Для реализации поставленной цели из упомянутой базы данных извлечены показатели фитомассы древостоев ольхи серой (*Alnus incana* L.) и ольхи черной (*A. glutinosa* L.) в количестве 170 пробных площадей для фракций надземной фитомассы и 75 — для фитомассы корней. По сравнению с основными лесообразующими породами данных о фитомассе названных двух пород существенно меньше, и для получения более надежных закономерностей эти данные были

Статистическая характеристика модели (1), рассчитанных по фактическим данным

Statistical characteristics of the model (1) calculated from the actual data

| Зависимая переменная | Регрессионные коэффициенты при независимых переменных | | | | | Коэффициент детерминации $adjR^2$, скорректированный на количество переменных | Стандартная ошибка модели (1) |
|---------------------------------|---|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|--|-------------------------------|
| | a_0 | $a_1 \ln A$ | $a_2 (\ln A)^2$ | $a_3 (\ln Lat)$ | $a_4 (\ln Lng)$ | | |
| $\ln\left(\frac{P_i}{M}\right)$ | | | | | | | |
| $\ln\left(\frac{P_f}{M}\right)$ | -1,1571 | -2,2927 | 0,2466 | 0,5285 | -0,1118 | 0,680 | 0,43 |
| $\ln\left(\frac{P_b}{M}\right)$ | -13,030 | -0,6435 | 0,0815 | 2,9131 | -0,1357 | 0,491 | 0,31 |
| $\ln\left(\frac{P_s}{M}\right)$ | -0,8334 | 0,2284 | -0,0232 | -0,0944 | -0,0357 | 0,378 | 0,08 |
| $\ln\left(\frac{P_a}{M}\right)$ | -0,7652 | -0,4754 | 0,0775 | 0,2347 | -0,0500 | 0,238 | 0,10 |
| $\ln\left(\frac{P_r}{M}\right)$ | 7,1247 | -1,7648 | 0,2880 | -1,8260 | 0,1746 | 0,327 | 0,26 |

Примечание. Полужирным выделен регрессионный коэффициент, не значимый на уровне $p < 0,05$.

объединены. Ареал ольхи черной относительно ареала ольхи серой существенно сдвинут к западу и югу [32], что послужило еще одним поводом для объединения данных, поскольку расширение географических градиентов в случае их использования в качестве независимых переменных в регрессионном анализе значительно повышает адекватность моделей [33]. Это дало возможность разработать модели КОК, обобщенные для двух пород ольхи и продвигаемые в зарубежной литературе как «generic models» [34, 35]. Наши исходные данные представлены в диапазоне возраста от 3 до 93 лет, запасов стволовой древесины — от 5 до 578 м³/га, надземной фитомассы — от 5 до 342 т/га и фитомассы корней — от 1 до 65 т/га, а также в географических диапазонах от 47° до 68° с. ш. и от 1° до 42° в. д.

Исходные данные КОК древостоев в связи с возрастом и географическими координатами нами обработаны по программе стандартного регрессионного анализа согласно структуре регрессионной модели

$$\ln\left(\frac{P_i}{M}\right) = a_0 + a_1 \ln A + a_2 (\ln A)^2 + a_3 (\ln Lat) + a_4 (\ln Lng), \quad (1)$$

где P_i — фитомасса древостоев в абсолютно сухом состоянии: P_f , P_b , P_s , P_a , P_r — соответственно фитомасса листьев, ветвей, стволов, надземная и корней, т/га;

M — запас стволовой древесины, м³/га;

A — возраст древостоя, лет;

Lat и Lng — соответственно географическая широта и географическая долгота, град;

a_0 — свободный член модели, скорректированный на логарифмическое преобразование [36];

$a_1 \dots a_4$ — регрессионные коэффициенты модели.

Результаты и обсуждение

Результаты расчета модели (1) представлены в таблице.

Модель (1) для КОК ствола $\left(\frac{P_s}{M}\right)$, представляющая базисную плотность древесины с корой, не согласуется с закономерностью, общей для фитомассы листьев, ветвей и надземной. Если регрессионные коэффициенты для зависимых переменных $\ln\left(\frac{P_f}{M}\right)$, $\ln\left(\frac{P_b}{M}\right)$ и $\ln\left(\frac{P_a}{M}\right)$ при $\ln A$ имеют знак «-», а при $(\ln A)^2$ — знак «+», то для $\ln\left(\frac{P_s}{M}\right)$ наоборот, т. е. знаки меняются местами. К тому же регрессионный коэффициент при переменной $\ln Lat$ для $\ln\left(\frac{P_s}{M}\right)$ статистически не достоверен.

Это можно объяснить изменением базисной плотности под влиянием факторов, отличных от факторов, влияющих на соотношение фитомассы кроны и объема ствола. Эта особенность КОК для фитомассы ствола была ранее отмечена Д.Г. Замолотчиковым и соавт. [19], когда они для зависимости коэффициента $\frac{P_s}{M}$ от возраста получили среднее значение R^2 , равное 0,034, т. е. изменчивость КОК, объясненную лишь на 3,4 %.

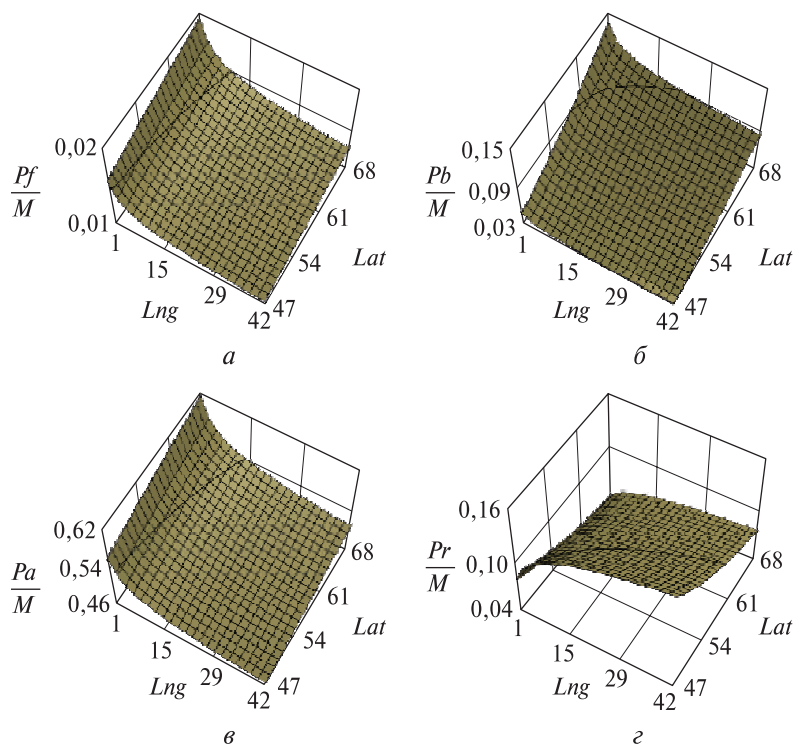


Рис. 1. Изменение расчетных значений конверсионно-объемных коэффициентов по географическим градиентам широты и долготы согласно модели (1) при значении возраста, равного 30 годам: *a*, *б*, *в*, *г* — конверсионно-объемные коэффициенты соответственно для фитомассы листвы, ветвей, надземной фитомассы и корней

Fig. 1. The change in the calculated values of expansion factor in geographical gradients of latitude and longitude according to the model (1) having the value of stand age equal to 30 years: *a*, *б*, *в*, *г* — expansion factors for foliage, branches, aboveground and root biomass respectively

Сделав вывод об отсутствии влияния таксационных показателей древостоев на величину коэффициента $\frac{P_s}{M}$ (т. е. базисной плотности), они ре-

комендовали использовать для всех возрастов одно среднее значение коэффициента $\frac{P_s}{M}$, в част-

ности для ольхи равное $0,552 \text{ т/м}^3$ [19].

Сравнительно невысокие значения коэффициентов детерминации модели (1), приведенных в таблице, в частности для зависимых переменных

$\ln\left(\frac{P_f}{M}\right)$, $\ln\left(\frac{P_b}{M}\right)$ и $\ln\left(\frac{P_r}{M}\right)$, равных соответственно

$0,680$; $0,491$ и $0,327$, оказались несколько выше средних значений для лесообразующих пород Северной Евразии, показанных Д.Г. Замолотчиковым и соавт. [19]: соответственно $0,581$, $0,356$ и $0,312$. Наличие разных значений величины R^2 для различных фракций соответствует ранее полученному выводу: чем теснее взаимно коррелируют показатели фитомассы различных фракций, тем ниже коэффициент детерминации при выводе зависимости их отношения от таксационных показателей [37].

Еще более низким оказалось значение коэффициента $\frac{P_a}{M}$, равное $0,238$. Тем не менее оно

сопоставимо с ранее полученным результатом для ели европейской [15], в соответствии с которым зависимость этого коэффициента от возраста древостоя характеризуется коэффициентом детерминации $0,273$. В работе [15] зависимости коэффициента $\frac{P_a}{M}$ от возраста для других пород имеют

еще более низкие значения коэффициентов детерминации, в частности для сосны обыкновенной и лиственных пород соответственно $0,087$ и $0,038$ [15].

Отметив данную особенность коэффициента $\frac{P_s}{M}$, дальнейший анализ полученных закономер-

ностей в их графической интерпретации мы выполняем для коэффициентов фитомассы листвы, ветвей, надземной и корней путем табулирования модели (1), при среднем значении возраста древостоев 30 лет (рис. 1). Для оценки фитомассы стволов можно использовать или модель (1), или, выведенное, по нашим исходным данным, среднее значение коэффициента $\frac{P_s}{M}$, равное $0,440 \pm 0,06 \text{ т/м}^3$.

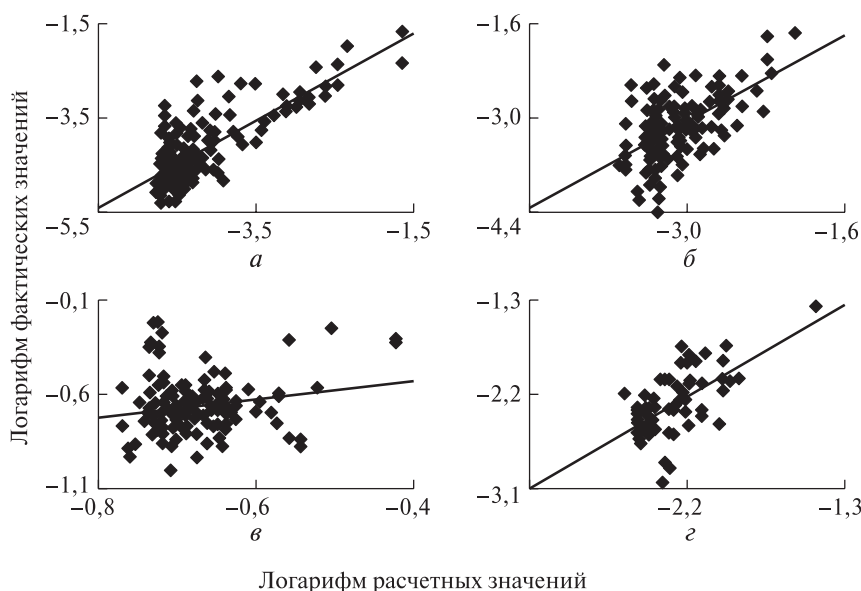


Рис. 2. Соотношение расчетных и фактических значений конверсионно-объемных коэффициентов для фитомассы листвы (*a*), ветвей (*б*), надземной фитомассы (*в*) и корней (*г*)

Fig. 2. The ratio of calculated and empirical values of expansion factors for foliage (*a*), branches (*б*), aboveground biomass (*в*) and roots (*г*)

Это согласуется с результатом, полученным Д.Г. Щепашенко и соавт. [26], согласно которому указанный показатель изменяется от 0,42 в молодняках до 0,46 в спелых древостоях, но он имеет существенно более низкие значения, чем 0,552 т/м³, предложенное Д.Г. Замолодчиковым и соавт. [19].

Соотношение расчетных и фактических значений КОК (рис. 2) дает представление об остаточном варьировании и характере распределения остатков.

При повышении широты, т. е. в направлении с юга на север, КОК всех фракций надземной фитомассы увеличивается, что согласуется с результатом, полученным Д.Г. Щепашенко и соавт. [26]. В том же направлении КОК массы корней снижается, что противоречит результату, полученному этими же авторами [26]. При увеличении долготы, т. е. в направлении с запада на восток в пределах ареала ольхи, КОК фракций надземной фитомассы снижается, а КОК массы корней увеличивается. Исходя из рис. 1, можно рассчитать процентные изменения КОК, приходящиеся на один градус широты и долготы. Для фитомассы листвы, ветвей и надземной фитомассы при повышении широты на один градус происходит увеличение КОК соответственно на 1,3; 9,5 и 0,4 % и снижение КОК корней на 4,1 %. При повышении долготы на один градус происходит снижение КОК для фитомассы листвы, ветвей и надземной фитомассы на 1,3; 1,4 и 0,5 % и увеличение КОК корней на 2,0 %. Таким образом, изменения КОК надземной фитомассы и корней в географических градиентах имеют противоположный характер.

Аналогичный противоположный характер изменения надземной и подземной фитомассы древостоев по мере климатически обусловленных изменений условий среды произрастания был выявлен для основных лесобразующих пород Евразии [38]. Показано, что тенденции такого изменения прямо противоположны, т. е. факторы, ограничивающие объем надземной фитомассы, являются стимулирующими для фитомассы корней и наоборот. Эта зеркальность в соотношениях надземной и подземной фитомасс в их реакции на внешние факторы, по-видимому, отражает общую жизненную стратегию устойчивого роста той или иной древесной породы. На любой фактор среды, снижающий продуктивность надземной фитомассы, древостой отвечает увеличением массы корней [38].

Выводы

Предложенная модель конверсионно-объемных коэффициентов надземной и подземной фитомассы древостоев ольхи предназначена для оценки фитомассы древостоев по значениям возраста и запаса стволовой древесины, получаемым в процессе лесоинвентаризации. В отличие от ранее опубликованных моделей, данная модель дифференцирована по географическим градиентам.

Впервые установлены статистически подтвержденные закономерности увеличения конверсионно-объемных коэффициентов для надземной фитомассы и снижения коэффициентов для фитомассы корней в направлении с юга

на север в пределах ареала ольхи, а в направлении с запада на восток эти коэффициенты для фракций надземной фитомассы снижаются и для фитомассы корней увеличиваются.


Зеркальность в соотношениях конверсионно-объемных коэффициентов надземной и подземной фитомасс в градиентах географических координат, опосредующих степень тепло- и влагообеспечения условий произрастания, отражает общую жизненную стратегию устойчивого роста той или иной древесной породы. На любой фактор среды, снижающий продуктивность надземной фитомассы, древостой отвечает увеличением массы корней.

Список литературы

- [1] Lenton T.M., Rockström J., Gaffney O., Rahmstorf S., Richardson K., Steffen K.W., Schellnhuber H.J. Climate tipping points — too risky to bet against // *Nature*, 2019, v. 575, pp. 592–595. DOI:10.1038/d41586-019-03595-0
- [2] Díaz S., Settele J., Brondizio E.S., Ngo H.T., Agard J., Arneth A., Balvanera P., Brauman K.A., Butchart S.H.M., Chan K.M.A., Lucas A.G., Ichii K., Liu J., Subramanian S.M., Midgley G.F., Miloslavich P., Molnár Z., Obura D., Pfaff A., Polasky S., Purvis A., Razzaque J., Reyers B., Chowdhury R.R., Shin Y.J., Visseren-Hamakers I., Willis K.J., Zayas C.N. Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change // *Science*, 2019, v. 366, article 1327.
- [3] Malhi Y., Franklin J., Seddon N., Solan M., Turner M.G., Field C.B., Knowlton N. Climate change and ecosystems: threats, opportunities and solutions // *Philosophical Transactions of The Royal Society B*, 2020, v. 375, article 20190104.
- [4] Ripple W.J., Wolf C., Newsome T.M., Barnard P., Moomaw W.R. World scientists' warning of a climate emergency // *BioScience*, 2019, v. 70, no. 1, pp. 8–12.
- [5] Schepaschenko D., Moltchanova E., Fedorov S., Karminov V., Ontikov P., Santoro M., See L., Kositsyn V., Shvidenko A., Romanovskaya A., Korotkov V., Lesiv M., Bartalev S., Fritz S., Shchepashchenko M., Kraxner F. Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported // *Scientific Reports*, 2021, v. 11, no. 1, article number 12825. DOI: 10.1038/s41598-021-92152-9
- [6] Usoltsev V.A., Shakoor A., Zaib G., Trogisch S., Ma X., Tsepordey I.S. Changes in foliage biomass of the genera *Larix* and *Pinus* along gradients of temperature and precipitation in Eurasia // *Pakistan J. of Botany*, 2022, v. 54, no. 4, pp. 1–7. DOI: 10.30848/PJB2022-4(20)
- [7] Shobairi S.O.R., Lin H., Usoltsev V.A., Osmirko A.A., Tsepordey I.S., Ye Z., Anees S.A. A comparative pattern for *Populus* spp. and *Betula* spp. stand biomass in Eurasian climate gradients // *Croatian J. of Forest Engineering*, 2022, v. 43, no. 2, pp. 457–467. DOI: 10.5552/crojfe.2022.1340
- [8] He X., Lei X., Zeng W., Feng L., Zhou C., Wu B. Quantifying the effects of stand and climate variables on biomass of larch plantations using random forests and National Forest Inventory data in North and Northeast China // *Sustainability*, 2022, v. 14, article 5580. DOI:10.3390/su14095580
- [9] Wang Y., Miao Z., Hao Y., Dong L., Li F. Effects of biotic and abiotic factors on biomass conversion and expansion factors of natural white birch forest (*Betula platyphylla* Suk.) in Northeast China // *Forests*, 2023, v. 14, article 362, DOI:10.3390/f14020362
- [10] Liepinš J., Lazdinš A., Kaleja S., Liepinš K. Species composition affects the accuracy of stand-level biomass models in hemiboreal forests // *Land*, 2022, v. 11, article 108. DOI:10.3390/land11071108
- [11] Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Коровин Г.Н. Определение запасов углерода по зависимым от возраста насаждений конверсионно-объемным коэффициентам // *Лесоведение*, 1998. № 3. С. 84–93.
- [12] Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Честных О.В. Коэффициенты конверсии запасов насаждений в фитомассу для основных лесобразующих пород России // *Лесная таксация и лесоустройство*, 2003. № 1. С. 119–127.
- [13] Поздняков Л.К., Протопопов В.В., Горбатенко В.М. Биологическая продуктивность лесов Средней Сибири и Якутии. Красноярск: Книжное изд-во, 1969. 120 с.
- [14] Dong L., Widagdo F.R.A., Xie L., Li F. Biomass and volume modeling along with carbon concentration variations of short-rotation poplar plantations // *Forests*, 2020, v. 11, article 780. DOI:10.3390/f11070780
- [15] Lehtonen A., Mäkipää R., Heikkinen J., Sievänen R., Liski J. Biomass expansion factors (BEFs) for Scots pine, Norway spruce and birch according to stand age for boreal forests // *Forest Ecology and Management*, 2004, v. 188, pp. 211–224.
- [16] Teobaldelli M., Somogyi Z., Migliavacca M., Usoltsev V.A. Generalized functions of biomass expansion factors for conifers and broadleaved by stand age, growing stock and site index // *Forest Ecology and Management*, 2009, v. 257, pp. 1004–1013. DOI:10.1016/j.foreco.2008.11.002
- [17] Guo Z., Fang J., Pan Y., Birdsey R. Inventory-based estimates of forest biomass carbon stocks in China: A comparison of three methods // *Forest Ecology and Management*, 2010, v. 259, pp. 1225–1231.
- [18] Lisboa S.N., Guedes B.S., Ribeiro N., Siteo A. Biomass allometric equation and expansion factor for a mountain moist evergreen forest in Mozambique // *Carbon Balance and Management*, 2018, v. 13, article 23. DOI:10.1186/s13021-018-0111-7
- [19] Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Коровин Г.Н. Конверсионные коэффициенты фитомасса/запас в связи с дендрометрическими показателями и составом древостоев // *Лесоведение*, 2005. № 6. С. 73–81.
- [20] Dong L., Zhang L., Li F. Evaluation of stand biomass estimation methods for major forest types in the eastern Da Xing'an Mountains, Northeast China // *Forests*, 2019, v. 10, article 715. DOI:10.3390/f10090715
- [21] Usoltsev V.A., Hoffmann C.W. Combining harvest sample data with inventory data to estimate forest biomass // *Scandinavian J. of Forest Research*, 1997, v. 12, no. 3, pp. 273–279.
- [22] Jagodziński A.M., Dyderski M.K., Gęsikiewicz K., Horodecki P., Cysewska A., Wierczyńska S., Maciejczyk K. How do tree stand parameters affect young Scots pine biomass? — Allometric equations and biomass conversion and expansion factors // *Forest Ecology and Management*, 2018, v. 409, pp. 74–83. DOI:10.1016/j.foreco.2017.11.001
- [23] Jagodziński A.M., Dyderski M.K., Gęsikiewicz K., Horodecki P. Tree and stand level estimations of *Abies alba* Mill. aboveground biomass // *Annals of Forest Science*, 2019, v. 76, article 56. DOI:10.1007/s13595-019-0842-y
- [24] Zhu W., Xu Y., Wang Z., Du A. Biomass estimation coefficient and its impacting factors for *Eucalyptus* plantation in China // *Scientia Silvae Sinicae*, 2020, v. 56, no. 5, pp. 1–11.
- [25] Zhao J., Hu H., Wang J. Forest carbon reserve calculation and comprehensive economic value evaluation: A forest management model based on both biomass expansion fac-

- tor method and total forest value // International J. of Environmental Research and Public Health, 2022, v. 19, article 15925. DOI:10.3390/ijerph192315925
- [26] Schepaschenko D., Moltchanova E., Shvidenko A., Blyshchyk V., Dmitriev E., Martynenko O., See L., Kraxner F. Improved estimates of biomass expansion factors for Russian forests // Forests, 2018, v. 9, article 312. DOI:10.3390/f9060312
- [27] Lohmus K., Mander U., Tullus H., Keedus K. Productivity, buffering capacity and resources of grey alder forests in Estonia // Short rotation willow coppice for renewable energy and improved environment. K. Perttu and A. Koppel (eds). Swedish University of Agricultural Sciences: Uppsala, Sweden, 1996, pp. 95–105.
- [28] Aosaar J., Varik M., Uri V. Biomass production potential of grey alder (*Alnus incana* (L.) Moench.) in Scandinavia and Eastern Europe: A review // Biomass and Bioenergy, 2012, v. 45, pp. 11–26.
- [29] Daugavietis M., Daugaviete M., Bisenieks J. Management of grey alder (*Alnus incana* (L.) Moench.) stands in Latvia // Proceedings of 8th International Scientific Conference on Engineering for Rural Development. Jelgava, Latvia, May 28–29, 2009. L. Malinovska et al. (eds.). Latvian University of Agriculture, Jelgava, Latvia, 2009, pp. 229–234.
- [30] Усольцев В.А. Биомасса и первичная продукция лесов Евразии. Электронная база данных. Екатеринбург: Ботанический сад УрО РАН, Уральский государственный лесотехнический университет, 2023. URL: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12452> (дата обращения 05.03.2023).
- [31] Назимова Д.И. Климатическая ординация лесных экосистем как основа их классификации // Лесоведение, 1995. № 4. С. 63–73.
- [32] Деревья и кустарники СССР. Т. 2 / под ред. С.Я. Соколова. М.; Л.: АН СССР, 1951. 612 с.
- [33] Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279с.
- [34] Wirth C., Schumacher J., Schulze E.-D. Generic biomass functions for Norway spruce in Central Europe — a meta-analysis approach toward prediction and uncertainty estimation // Tree Physiology, 2004, v. 24, pp. 121–139.
- [35] Rutishauser E., Nooran F., Laumonier Y., Halperin J., Hergoualch K., Verchot L. Generic allometric models including height best estimate forest biomass and carbon stocks in Indonesia // Forest Ecology and Management, 2013, v. 307, pp. 219–225. DOI:10.1016/j.foreco.2013.07.013
- [36] Baskerville G.L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass // Canadian J. of Forest Research, 1972, v. 2, no. 1, pp. 49–53.
- [37] Усольцев В.А. Моделирование структуры и динамики фитомассы древостоев. Красноярск: Изд-во Красноярского ун-та, 1985. 191 с.
- [38] Усольцев В.А., Цепордей И.С. Отношение подземной биомассы к надземной лесообразующих видов Евразии в градиентах температур и осадков // Биосфера, 2022. Т. 14. № 3. С. 158–179. DOI: 10.24855/biosfera.v14i2.673

Сведения об авторах

Усольцев Владимир Андреевич  — д-р с.-х. наук, профессор, гл. науч. сотр., ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук» (Ботанический сад УрО РАН), профессор кафедры лесоводства, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», Usoltsev50@mail.ru

Цепордей Иван Степанович — канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр. ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук» (Ботанический сад УрО РАН), ivan.tsepordey@yandex.ru

Карaban Алексей Александрович — лаборант-исследователь, аспирант, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), karaban@sevniilh-arh.ru

Третьяков Сергей Васильевич — д-р с.-х. наук, профессор, ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства», ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), s.v.tretyakov@narfu.ru

Коптев Сергей Викторович — д-р с.-х. наук, профессор, ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства», ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), s.koptev@narfu.ru

Парамонов Андрей Алексеевич — канд. с.-х. наук, науч. сотр., ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства», a.paramonov@sevniilh-arh.ru

Поступила в редакцию 25.05.2023.

Одобрено после рецензирования 21.08.2023.

Принята к публикации 21.12.2023.

REGRESSION MODEL FOR ALDER BIOMASS ANALYSIS OF ITS CONVERSION AND EXPANSION FACTORS IN GEOGRAPHICAL GRADIENTS OF EURASIA

V.A. Usoltsev^{1,2✉}, I.S. Tsepordey², A.A. Karaban^{3,4}, S.V. Tretyakov^{3,4}, S.V. Koptev^{3,4}, A.A. Paramonov³

¹Ural State Forestry Engineering University, 37, Siberian tract, 620100, Yekaterinburg, Russia

²Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 202a, 8 Marta st., 620144, Yekaterinburg, Russia

³Northern Research Institute of Forestry, 13, Nikitova st., 163062, Arkhangelsk, Russia

⁴Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 163002, Arkhangelsk, Russia

Usoltsev50@mail.ru

Since the use of generic allometric models of tree biomass in specific geographical conditions leads to significant biases caused by regional geographically determined climatic peculiarities, the article aims to analyze the change in the biomass conversion and expansion factors using the alder stands in geographical gradients of Eurasia. Biomass conversion and expansion factors represent the ratio of biomass of a particular fraction in dry condition to the stem volume in fresh condition. The basis of the study was the author's database of 170 sample plots for fractions of aboveground biomass and 75 plots for root biomass. A statistically significant regression model of the biomass conversion and expansion factors is proposed, which includes independent variables the stand age, geographical latitude and geographical longitude and explains from 24 to 68 % of the variability of the biomass conversion and expansion factors of a particular fraction of biomass. It was found that in the direction from south to north, the above-mentioned coefficients for the fractions of aboveground biomass increase and they decrease for the mass of roots. In the direction from west to east within the range of alder, the coefficients for the fractions of aboveground biomass decrease and they increase for the root biomass. The proposed models are designed to assess the biomass of alder stands using the known values of age and stock of stem volume. Unlike previously published models, the proposed models are differentiated by geographical coordinates of latitude and longitude.

Keywords: *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn., *A. incana* (L.) Moench, biomass expansion factors, geographical gradients, regression models

Suggested citation: Usoltsev V.A., Tsepordey I.S., Karaban A.A., Tretyakov S.V., Koptev S.V., Paramonov A.A. *Ispol'zovanie regressionnoy modeli pri analize konversionno-ob'emnykh koeffitsientov fitomassy ol'khi v geograficheskikh gradientakh Evrazii* [Regression model for alder biomass analysis of its conversion and expansion factors in geographical gradients of Eurasia]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 2, pp. 156–165. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-156-165

References

- [1] Lenton T.M., Rockström J., Gaffney O., Rahmstorf S., Richardson K., Steffen K.W., Schellnhuber H.J. Climate tipping points — too risky to bet against. *Nature*, 2019, v. 575, pp. 592–595. DOI:10.1038/d41586-019-03595-0
- [2] Diaz S., Settele J., Brondizio E.S., Ngo H.T., Agard J., Arneth A., Balvanera P., Brauman K.A., Butchart S.H.M., Chan K.M.A., Lucas A.G., Ichii K., Liu J., Subramanian S.M., Midgley G.F., Miloslavich P., Molnár Z., Obura D., Pfaff A., Polasky S., Purvis A., Razaqzaque J., Reyers B., Chowdhury R.R., Shin Y.J., Visseren-Hamakers I., Willis K.J., Zayas C.N. Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. *Science*, 2019, v. 366, article 1327.
- [3] Malhi Y., Franklin J., Seddon N., Solan M., Turner M.G., Field C.B., Knowlton N. Climate change and ecosystems: threats, opportunities and solutions. *Philosophical Transactions of The Royal Society B*, 2020, v. 375, article 20190104.
- [4] Ripple W.J., Wolf C., Newsome T.M., Barnard P., Moomaw W.R. World scientists' warning of a climate emergency. *BioScience*, 2019, v. 70, no. 1, pp. 8–12.
- [5] Schepaschenko D., Moltchanova E., Fedorov S., Karminov V., Ontikov P., Santoro M., See L., Kositsyn V., Shvidenko A., Romanovskaya A., Korotkov V., Lesiv M., Bartalev S., Fritz S., Shchepashchenko M., Kraxner F. Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported. *Scientific Reports*, 2021, v. 11, no. 1, article number 12825. DOI: 10.1038/s41598-021-92152-9
- [6] Usoltsev V.A., Shakoor A., Zaib G., Trogisch S., Ma X., Tsepordey I.S. Changes in foliage biomass of the genera *Larix* and *Pinus* along gradients of temperature and precipitation in Eurasia. *Pakistan J. of Botany*, 2022, v. 54, no. 4, pp. 1–7. DOI: 10.30848/PJB2022-4(20)
- [7] Shobairi S.O.R., Lin H., Usoltsev V.A., Osmirko A.A., Tsepordey I.S., Ye Z., Anees S.A. A comparative pattern for *Populus* spp. and *Betula* spp. stand biomass in Eurasian climate gradients. *Croatian J. of Forest Engineering*, 2022, v. 43, no. 2, pp. 457–467. DOI: 10.5552/crojfe.2022.1340
- [8] He X., Lei X., Zeng W., Feng L., Zhou C., Wu B. Quantifying the effects of stand and climate variables on biomass of larch plantations using random forests and National Forest Inventory data in North and Northeast China. *Sustainability*, 2022, v. 14, article 5580. DOI:10.3390/su14095580
- [9] Wang Y., Miao Z., Hao Y., Dong L., Li F. Effects of biotic and abiotic factors on biomass conversion and expansion factors of natural white birch forest (*Betula platyphylla* Suk.) in Northeast China. *Forests*, 2023, v. 14, article 362. DOI:10.3390/f14020362
- [10] Liepinš J., Lazdinš A., Kaleja S., Liepinš K. Species composition affects the accuracy of stand-level biomass models in hemiboreal forests. *Land*, 2022, v. 11, article 108. DOI:10.3390/land11071108

- [11] Zamolodchikov D.G., Utkin A.I., Korovin G.N. *Opređenje zapasov ugljeka po zavisimym ot vozrasta nasazhdeniy konversionno-ob'emnykh koeffitsientam* [Determination of carbon reserves by conversion-volume coefficients dependent on the age of plantings]. *Lesovedenie*, 1998, no. 3, pp. 84–93.
- [12] Zamolodchikov D.G., Utkin A.I., Chestnykh O.V. *Koeffitsienty konversii zapasov nasazhdeniy v fitomassu dlya osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod Rossii* [Conversion coefficients of planting stocks into phytomass for the main forest-forming species of Russia]. *Lesnaya taksatsiya i lesoustroystvo* [Forest taxation and forest management], 2003, no. 1, pp. 119–127.
- [13] Pozdnyakov L.K., Protopopov V.V., Gorbatenko V.M. *Biologicheskaya produktivnost' lesov Sredney Sibiri i Yakutii* [Biological productivity of forests in Central Siberia and Yakutia]. Krasnoyarsk: Book publishing house, 1969, 120 p.
- [14] Dong L., Widagdo F.R.A., Xie L., Li F. Biomass and volume modeling along with carbon concentration variations of short-rotation poplar plantations. *Forests*, 2020, v. 11, article 780. DOI:10.3390/f11070780
- [15] Lehtonen A., Mäkipää R., Heikkinen J., Sievänen R., Liski J. Biomass expansion factors (BEFs) for Scots pine, Norway spruce and birch according to stand age for boreal forests. *Forest Ecology and Management*, 2004, v. 188, pp. 211–224.
- [16] Teobaldelli M., Somogyi Z., Migliavacca M., Usoltsev V.A. Generalized functions of biomass expansion factors for conifers and broadleaved by stand age, growing stock and site index. *Forest Ecology and Management*, 2009, v. 257, pp. 1004–1013. DOI:10.1016/j.foreco.2008.11.002
- [17] Guo Z., Fang J., Pan Y., Birdsey R. Inventory-based estimates of forest biomass carbon stocks in China: A comparison of three methods. *Forest Ecology and Management*, 2010, v. 259, pp. 1225–1231.
- [18] Lisboa S.N., Guedes B.S., Ribeiro N., Siteo A. Biomass allometric equation and expansion factor for a mountain moist evergreen forest in Mozambique. *Carbon Balance and Management*, 2018, v. 13, article 23. DOI:10.1186/s13021-018-0111-7
- [19] Zamolodchikov D.G., Utkin A.I., Korovin G.N. *Konversionnye koeffitsienty fitomassa/zapas v svyazi s dendrometricheskimi pokazatelyami i sostavom drevostoev* [Conversion coefficients phytomass/stock in connection with dendrometric indicators and composition of forest stands]. *Lesovedenie*, 2005, no. 6, pp. 73–81.
- [20] Dong L., Zhang L., Li F. Evaluation of stand biomass estimation methods for major forest types in the eastern Da Xing'an Mountains, Northeast China. *Forests*, 2019, v. 10, article 715. DOI:10.3390/f10090715
- [21] Usoltsev V.A., Hoffmann C.W. Combining harvest sample data with inventory data to estimate forest biomass. *Scandinavian J. of Forest Research*, 1997, v. 12, no. 3, pp. 273–279.
- [22] Jagodziński A.M., Dyderski M.K., Gęsikiewicz K., Horodecki P., Cysewska A., Wierczyńska S., Maciejczyk K. How do tree stand parameters affect young Scots pine biomass? — Allometric equations and biomass conversion and expansion factors. *Forest Ecology and Management*, 2018, v. 409, pp. 74–83. DOI:10.1016/j.foreco.2017.11.001
- [23] Jagodziński A.M., Dyderski M.K., Gęsikiewicz K., Horodecki P. Tree and stand level estimations of *Abies alba* Mill. aboveground biomass. *Annals of Forest Science*, 2019, v. 76, article 56. DOI:10.1007/s13595-019-0842-y
- [24] Zhu W., Xu Y., Wang Z., Du A. Biomass estimation coefficient and its impacting factors for *Eucalyptus* plantation in China. *Scientia Silvae Sinicae*, 2020, v. 56, no. 5, pp. 1–11.
- [25] Zhao J., Hu H., Wang J. Forest carbon reserve calculation and comprehensive economic value evaluation: A forest management model based on both biomass expansion factor method and total forest value. *International J. of Environmental Research and Public Health*, 2022, v. 19, article 15925. DOI:10.3390/ijerph192315925
- [26] Schepaschenko D., Moltchanova E., Shvidenko A., Blyshchik V., Dmitriev E., Martynenko O., See L., Kraxner F. Improved estimates of biomass expansion factors for Russian forests. *Forests*, 2018, v. 9, article 312. DOI:10.3390/f9060312
- [27] Lohmus K., Mander U., Tullus H., Keedus K. Productivity, buffering capacity and resources of grey alder forests in Estonia. Short rotation willow coppice for renewable energy and improved environment. K. Perttu and A. Koppel (eds). Swedish University of Agricultural Sciences: Uppsala, Sweden, 1996, pp. 95–105.
- [28] Aosaar J., Varik M., Uri V. Biomass production potential of grey alder (*Alnus incana* (L.) Moench.) in Scandinavia and Eastern Europe: A review. *Biomass and Bioenergy*, 2012, v. 45, pp. 11–26.
- [29] Daugavietis M., Daugaviete M., Bisenieks J. Management of grey alder (*Alnus incana* (L.) Moench.) stands in Latvia. Proceedings of 8th International Scientific Conference on Engineering for Rural Development. Jelgava, Latvia, May 28–29, 2009. L. Malinovska et al. (eds.). Latvian University of Agriculture, Jelgava, Latvia, 2009, pp. 229–234.
- [30] Usoltsev V.A. *Biomassa i pervichnaya produkcziya lesov Evrazii. Elektronnaya baza dannykh* [Biomass and primary production of Eurasian forests. Electronic database]. Ekaterinburg: Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ural State Forestry University, 2023. Available at: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12452> (accessed 05.03.2023).
- [31] Nazimova D.I. *Klimaticheskaya ordinatsiya lesnykh ekosistem kak osnova ikh klassifikatsii* [Climatic ordination of forest ecosystems as the basis for their classification]. *Lesovedenie*, 1995, no. 4, pp. 63–73.
- [32] *Derev'ya i kustarniki SSSR* [Trees and shrubs of the USSR]. T. 2. Ed. S.Ya. Sokolova. Moscow; Leningrad: USSR Academy of Sciences, 1951, 612 p.
- [33] Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskiy Yu.V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy* [Planning an experiment when searching for optimal conditions]. Moscow: Nauka, 1976, 279 p.
- [34] Wirth C., Schumacher J., Schulze E.-D. Generic biomass functions for Norway spruce in Central Europe — a meta-analysis approach toward prediction and uncertainty estimation. *Tree Physiology*, 2004, v. 24, pp. 121–139.
- [35] Rutishauser E., Nooran F., Laumonier Y., Halperin J., Hergoualch K., Verchot L. Generic allometric models including height best estimate forest biomass and carbon stocks in Indonesia. *Forest Ecology and Management*, 2013, v. 307, pp. 219–225. DOI:10.1016/j.foreco.2013.07.013
- [36] Baskerville G.L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. *Canadian J. of Forest Research*, 1972, v. 2, no. 1, pp. 49–53.
- [37] Usoltsev V.A. *Modelirovanie struktury i dinamiki fitomassy drevostoev* [Modeling the structure and dynamics of phytomass of forest stands]. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk University Publishing House, 1985, 191 p.
- [38] Usoltsev V.A., Tseporday I.S. *Otnoshenie podzemnoy biomassy k nadzemnoy lesoobrazuyushchikh vidov Evrazii v gradientakh temperatur i osadkov* [The ratio of underground to aboveground biomass of forest-forming species of Eurasia in temperature and precipitation gradients]. *Biosfera* [Biosphere], 2022, v. 14, no. 3, pp. 158–179. DOI: 10.24855/biosfera.v14i2.673

Authors' information

Usoltsev Vladimir Andreevich [✉] — Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Chief Scientist of the Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (BS UrO RAS), Professor of the Forestry Department of the Ural State Forestry University, Usoltsev50@mail.ru

Tsepordey Ivan Stepanovich — Cand. Sci. (Agriculture), Head scientist of the Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (BS UrO RAS), ivan.tsepordey@yandex.ru

Karaban Aleksey Aleksandrovich — laboratory researcher, post-graduate student, Northern Research Institute of Forestry, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, karaban@sevniilh-arh.ru

Tretyakov Sergey Vasilyevich — Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Northern Research Institute of Forestry, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, s.v.tretyakov@narfu.ru

Koptev Sergey Viktorovich — Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Northern Research Institute of Forestry, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, s.koptev@narfu.ru

Paramonov Andrey Alekseevich — Cand. Sci. (Agriculture), Northern Research Institute of Forestry, a.paramonov@sevniilh-arh.ru

Received 25.05.2023.

Approved after review 21.08.2023.

Accepted for publication 21.12.2023.

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

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ФОРМИРОВАНИЯ ЦЕПОЧЕК ПОСТАВОК СЫРЬЯ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ С ТОВАРНО-СЫРЬЕВОЙ БИРЖИ С ДЕТЕРМИНИРОВАННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Р.С. Рогулин

ФГБОУ ВО «Владивостокский государственный университет экономики и сервиса», Россия, 690014, г. Владивосток, ул. Гоголя, д. 41

rafassiaofusa@mail.ru

Рассмотрены значимые аспекты формирования цепочек поставок и объемов производства на предприятиях лесоперерабатывающей отрасли и проблема оценки оптимальности принимаемых решений. Приведен анализ лесопромышленных предприятий, не имеющих собственных источников сырья и ищущих оптимальное решение по его поставкам на основе информации о совершенных сделках на товарно-сырьевой бирже. Разработана математическая модель цепи поставок с учетом доли полезного объема сырья, продолжительности транспортировки и неопределенности. Выполнена проверка эффективности модели по данным биржи и предприятий Приморского края. Определен оптимальный вариант цепи поставок для получения предполагаемой прибыли, расширения объема производства и достижения других важных показателей. Приведены особенности планирования цепочек поставок и объемов производства. Проведен анализ регионов — источников сырья, преимуществ и недостатков математической модели. Результаты исследования можно использовать для совершения рациональных сделок на товарно-сырьевой бирже России и рекомендовать для топ-менеджмента лесопромышленных предприятий, которые стремятся повысить эффективность своей деятельности.

Ключевые слова: цепи поставок, расчет производства товаров, лесоперерабатывающие предприятия, товарно-сырьевая биржа, доля полезного объема сырья, время лотов в пути

Ссылка для цитирования: Рогулин Р.С. Решение задачи формирования цепочек поставок сырья лесопромышленных предприятий с товарно-сырьевой биржи с детерминированными параметрами // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 2. С. 166–174. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-166-174

В условиях современной глобальной экономики и быстро изменяющейся бизнес-среды эффективное формирование цепочек поставок сырья становится стратегически важным для лесопромышленных предприятий. Сырьевая база представляет собой неотъемлемую составляющую производственного процесса, а эффективное управление цепочками поставок сырья прямо влияет на конкурентоспособность и прибыльность предприятий.

Формирование оптимальных цепочек поставок (англ. — supply chain, SC) сырья сталкивается со сложностями особенно в условиях неопределенности. Факторы изменения спроса колебания объемов и качества сырья, транспортные ограничения и географические особенности способствуют развитию условий неопределенности и возможности риска при принятии решений. В такой ситуации актуальность приобретает разработка математической модели нахождения оптимальных решений для формирования цепочек поставок сырья с учетом всех сопутствующих факторов.

Актуальность данного исследования обусловлена не только стремительными изменениями в бизнес-среде, но и существующей необходимостью

снижения издержек, повышения эффективности производства, оптимизации использования ресурсов и улучшения общей конкурентоспособности предприятий. Такая математическая модель может стать необходимым инструментом при принятии решений в сфере формирования цепочек поставок сырья.

Исследования в области управления цепочками поставок сырья в условиях неопределенности часто ограничены эвристическими подходами и применением эмпирических методов, что ограничивает точность получаемых результатов и их применимость. Математическая модель, основанная на оптимизационных методах, послужит важным инструментом в достижении эффективности формирования цепочек поставок сырья лесопромышленных предприятий.

Обзор литературных источников. В сфере управления цепочками поставок сырья проведено обширное количество исследований. Авторы работы [1] предложили следующую цепочку поставок: один поставщик и два конкурирующих розничных продавца, уделив особое внимание соревнованию продавцов в области услуг и ценообразования и указав на то, что в определенных сценариях конкурирующие розничные продавцы выступают за усиление конкуренции.

В другом исследовании [2] проанализировано взаимодействие между сотрудничеством поставщиков и соревнованием между ними в цепочке поставке сырья, включая розничный и прямой каналы.

Авторы работы [3] разработали общую структуру стохастического равновесия запасов, в которой ключевые факторы — обслуживание и ценовое соревнование поставщиков.

В работе [4] основной акцент сделан на воздействие при обмене информацией об оптимальных стратегиях розничного продавца, предоставляющего услуги с добавленной стоимостью.

Другие исследователи [5] провели сравнительный анализ влияния чувствительности к рискам розничных продавцов на стратегии участников цепочки в двух различных цепочках поставок сырья. Их исследование представило структуру конкурентных цен и обслуживания исходя из неопределенности спроса и показало, что розничные продавцы с более высокой чувствительностью к риску имеют менее высокие оптимальные уровни обслуживания и розничные цены.

В работе [6] охарактеризованы общие стратегии обслуживания и ценообразования в разных каналах, в которых продавцы и розничные торговцы могли настраивать уровни обслуживания последовательно или одновременно. В исследовании [7] изложена двухуровневая модель цепочки поставок сырья по влиянию на обслуживание утвержденных производителей и тех, кто вводит новые продукты. Эти выводы показали, что ценовая и сервисная конкуренция влияют на издержки переработки и инвестиции в услуги, особенно для производителей новых продуктов.

В работе [8] представлена двухуровневая конкурентная модель цепочки поставок сырья с учетом конкуренции цен и обслуживания розничных продавцов. В исследовании [9] проанализирована модель цепочки поставок сырья, зависящая от колебания спроса, когда несколько конкурирующих розничных продавцов применяют различные стратегии ценообразования и обслуживания. Группа ученых [10] изучала двухканальную модель цепочки поставок сырья, также подверженную колебаниям спроса, с упором на сотрудничество розничных продавцов и соревнование в обслуживании и ценообразовании. В их исследовании использовались подходы из теории игр для достижения равновесия Штакельберга — Нэша, так как два конкурирующих розничных продавца и поставщик предоставляли продукт через прямой онлайн-канал.

В работе [11] рассмотрено распространение одного продукта одним производителем среди нескольких розничных продавцов в рамках цепочки поставок сырья с акцентом на пополне-

ние запасов и ценовую политику, основанную на соревновании моделей Бертрана и Курно. В дополнение к этому авторы расширили свои исследования, включив отношение ритейлеров к соревнованию и сотрудничеству [12]. Авторы статьи [13] разработали модель цепочки поставок сырья с неопределенностью спроса и децентрализованной структурой: один поставщик и несколько конкурирующих розничных продавцов. Они также предложили модель контрактов, позволяющую цепочке поставок иметь централизованную структуру.

Автор исследования [14] представил приближенное решение проблемы управления запасами в двухуровневой модели цепочки поставок: один производитель и несколько розничных продавцов, согласно которой розничные продавцы могли как конкурировать, так и сотрудничать. Коллектив ученых в работе [15] проанализировал децентрализованные и централизованные модели цепочки поставок, сфокусировав внимание на ценовом соревновании. Они представили следующую модель цепочки поставок: один поставщик и несколько дифференцированных розничных продавцов, согласно которой поставщики стремятся максимизировать количество розничных продавцов [16].

Множество исследований сосредоточено на вопросах управления запасами [17–36]. Например, авторы статьи [22] подошли к анализу координации и совместного использования запасов между розничными продавцами в цепочке поставок сырья с учетом независимых заказов и распределения запасов. В другом исследовании [32] была создана модель цепочки поставок сырья с децентрализованной структурой, включая производителя-монополиста и несколько розничных продавцов, и акцентом на ценовую политику. Группа ученых в статье [33] представила иную модель цепочки поставок сырья: один производитель и два розничных продавца, исходя из ценовой конкуренции и сотрудничества. В другом исследовании [34] был рассмотрен подход к прямой интеграции поставщиков и конкуренции между розничными продавцами с предоставлением поставщику возможности выбора сотрудничества с одним из розничных продавцов. Они провели анализ политики пополнения и ценообразования по моделям цепочки поставок сырья с централизованными и децентрализованными структурами [35].

Управление цепочками поставок сырья в рамках товарно-сырьевых бирж является одной из актуальных и всесторонне исследованных тем, представленных в научной литературе, однако оно характеризуется уникальными особенностями. В частности, недостаточное внимание уделяется

управлению цепочками поставок сырья в условиях неопределенности и рисков, особенно на товарно-сырьевых биржах. Обычно сырьевые сделки проходят напрямую между продавцами и покупателями в формате «бизнес для бизнеса» (business-to-business — B2B). Однако в лесной индустрии, особенно в РФ, многие компании продолжают работать за пределами официальных структур, избегая уплаты налогов. В результате на установление контактов между продавцами и покупателями может быть потрачено значительное время, что ограничивает доступ к клиентам и влияет на цены на сырье, а также ущемляет доходы национального бюджета, который упускает часть налоговых поступлений. Применение инструментов товарно-сырьевых бирж может повысить прозрачность сделок и расширить круг потенциальных клиентов продавцов, включая иностранные компании, нуждающиеся в сырье, без необходимости прямого контакта. Это может снизить цены на сырье и сделать его реализацию более эффективной.

В литературе по управлению цепочками поставок сырья часто рассматриваются вопросы, связанные с формированием и организацией эффективных цепочек. Для этого разрабатываются математические модели, учитывающие специфику отрасли, изучаются проблемы менеджмента, связанные с организацией производства и формированием цепочек поставок. При таких исследованиях широко применяются такие методики, как «бережливая логистика» (англ. — lean logistics), «шесть сигм» (англ. — six sigma) и др. Однако вопросы оценки возможной прибыли в условиях неопределенности и с учетом особенностей лесной индустрии остаются мало изученными и в научной литературе их недостаточно. Например, сокращение объема древесины при транспортировке до клиента является специфической проблемой лесного сектора, требующей особого внимания при формировании цепочек поставок и планировании производства.

Задача исследования

Задача исследования — изучение деятельности компаний в сфере лесной промышленности с помощью рассмотрения двух важных этапов производственного процесса: 1) закупки сырья на товарно-сырьевой бирже; 2) производства товаров на основе имеющихся запасов сырья. При этом важно уделить внимание источникам поставок сырья на товарно-сырьевую биржу. Биржа заключает договоры с арендаторами лесных участков в разных регионах, предоставляя им площадку для проведения торгов. После совершения сделки между предприятием (заказчиком) и продавцом (арендатором участка) по дальнейшей обработке

сырья, соответствующий договору объем сырья отправляется заказчику [23, 25]. Обычно компании получают заказы от клиентов заранее, что позволяет осуществлять долгосрочное планирование деятельности предприятия. Кроме того, спрос на продукцию лесопромышленной отрасли характеризуется сезонными колебаниями, что усложняет планирование [23, 25].

Цель работы

Цель работы — разработка математической модели по определению оптимальных объемов производства товаров на основе формируемых цепочек поставок сырья с товарно-сырьевой биржи, которая бы учитывала условия неопределенности в предложении и логистике в целях оценки максимальной прибыли на протяжении всего планировочного периода.

Для достижения намеченного результата необходимо выполнить:

1) анализ научных литературных источников, посвященных указанной проблеме;

2) разработать экономико-математическую модель, предназначенную для построения цепочек поставок сырья и определения оптимального объема производства товаров в сфере лесопромышленной индустрии. Особое внимание следует уделить вопросам распределения заказов в период времени, длительности доставки товарных партий на склад предприятия, анализу полученных результатов на практике путем тестирования модели.

Математическая модель. Процесс производства невозможен без обеспечения его необходимыми объемами запасов сырья. Для исследования были использованы данные, предоставляемые Санкт-Петербургской международной товарно-сырьевой биржей (далее — биржа) доступные для общественного использования (<https://spimex.com/markets/wood/trades/results/>). Ежедневно на бирже публикуется информация о проведенных сделках, ценах и объемах реализованного сырья. Биржа также предоставляет дополнительные услуги по доставке сырья до конечных потребителей, и эти расходы включаются в общую стоимость продукции. Выбор поставщика сырья возможен из множества регионов, откуда поступает необходимое сырье. В соответствии с принятой биржей практикой возможность приобретения сырья предоставляется только для всего его объема, который представляет собой лот. Процесс производства подразумевает следующие шаги: сырье доставляется на склад, затем оно проходит процесс переработки, преобразуясь в труху, и далее сжимается в плиты ориентированной структуры (oriented strand board, ОСБ). Каждый вид сырья требует своего типа плит ОСБ. Для транспортировки используются железнодорожные марш-

руты, в частности транссибирская магистраль, причем расходы на доставку лота включаются в цену продукции и оплачиваются отправителем.

Введем следующие обозначения параметров и переменных.

Параметры:

p_{km} — цена на товар типа k в день m ;

c_{ilrm} — цена лота i с типом сырья l из региона r , появившаяся на бирже в день m ;

A_{lk} — норма потребления сырья типа l на производство единицы товара типа k ;

$\gamma_{\tilde{m}m}$ — коэффициент порчи сырья, купленного в день \tilde{m} ко дню m ($m \geq \tilde{m}$);

V_{ilrm} — объем сырья в лоте i с типом сырья l из региона r , появившаяся на бирже в день m ;

H_{km} — максимальный объем производства товаров типа k в день m ;

\underline{b} — неприкосновенный уровень запаса сырья;

\bar{b} — максимальная вместимость склада;

B_0 — начальный бюджет;

FC — постоянные издержки;

M — горизонт планирования;

$T_{r\tilde{m}}$ — время, за которое выкупленный в день \tilde{m} лот из региона r дойдет до склада;

L_r — расстояние от склада до региона r ;

S_m — расстояние, пройденное заявкой в день m ;

β — константа;

$\varepsilon^{(1)}$ — шум;

left и right — минимальное и максимальное значение случайной величины, распределенной по равномерному закону;

$LN(a_m, \delta_m)$ — логнормальное распределение случайной величины с параметрами (a_m, δ_m) соответственно;

E — число различных наборов входных параметров $\{V_{ilrm}(e), c_{ilrm}(e), T_{r\tilde{m}}(e)\}$.

Переменные:

x_{km} — объем производства товаров типа k в день m ;

λ_{ilrm} — решение о покупке лота i с типом сырья l из региона r , появившегося на бирже в день m ;

b_{lm} — уровень запаса сырья типа l на складе в день m .

Обозначим решаемую задачу для каждого набора параметров e (список параметров указан выше) как $F^{(1,1)}(e)$ и она примет вид:

$$\sum_{k,m} p_{km} x_{km} - \sum_{i,l,r,m} c_{ilrm} \lambda_{ilrm} \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$b_{lm} = b_{l,m-1} - \sum_k A_{lk} x_{km} + \gamma_{\tilde{m}m} \sum_{i,r} V_{ilrm} \lambda_{ilrm}, \quad (2)$$

где выполняется условие $\tilde{m} = m - T_{r\tilde{m}}$;

$$x_{km} \in N; \quad (3)$$

$$\lambda_{ilrm} = \{0; 1\}; \quad (4)$$

$$0 \leq \sum_l b_{lm} \leq \bar{b}; \quad (5)$$

$$0 < b \leq b_{lm}; \quad (6)$$

$$B_0 + \sum_{m=1}^M \left(\sum_k p_{km} x_{km} - \sum_{i,l,r} c_{ilrm} - FC \right) \geq 0, \quad (7)$$

$$\underline{m} = 1 : M;$$

где $\tilde{m} = m - T_{r\tilde{m}}$;

$$T_{r\tilde{m}} = m^* : \begin{cases} \left| L_r - \sum_{m=\tilde{m}}^m S_m \right| \rightarrow \min, \\ L_r - \sum_{m=\tilde{m}}^m S_m \leq 0; \end{cases} \quad (8)$$

$$S_m \sim LN(a_m, \delta_m); \quad (9)$$

$$\gamma_{\tilde{m}m} = \min \left(1; \max \left[0; 1 - \frac{2}{\pi} \arctg(\beta(m - \tilde{m})) + \varepsilon^{(1)} \right] \right); \quad (10)$$

$$\varepsilon^{(1)} \sim U(\text{left}, \text{right}); \quad (11)$$

$$0 \leq x_{km} \leq H_{km}. \quad (12)$$

Поясним, что в ограничениях (2) и (7) значения $V_{ilr(m-T_{r\tilde{m}})}$ записываются в систему ограничений тогда и только тогда, когда выполняется условие $\tilde{m} = m - T_{r\tilde{m}}$. Задача $F^{(1,1)}(e)$ решается для всех $e = 1 : E$.

Рассмотрим выражения (1) — (12) подробнее.

Целевая функция (1) направлена на получение максимального значения прибыли в последний день горизонта планирования. Уровень запаса сырья в день m рассчитывается по формуле (2) исходя из затраченного объема сырья на производство — $\sum_k A_{lk} x_{km}$, запаса сырья на конец предыдущего дня — $b_{l,m-1}$, а также поступившего объема сырья на склад в текущий день с поправкой на время в пути \tilde{m} и, соответственно, на долю полезного объема сырья $\gamma_{\tilde{m}m}$. Объем производства (3) принимает только целые и неотрицательные значения. Факт принятия решения по вопросу покупки лота задается соотношением (4). Объем сырья на складе ограничен сверху значением максимальной вместимости склада (5) и снизу (6), так как не может быть отрицательным. Любое предприятие имеет свой бюджет, за пределы которого ему нельзя выходить (7). Время в пути каждой заявки рассчитывается исходя из соотношений (8), (9). В формуле (9) было введено допущение, что случайная величина расстояния, которое проходит лот в день m , имеет логнормальное распределение. Это связано с сезонностью на железной дороге, по которой идет транспортировка продукции до склада покупателя.

С данными можно детально ознакомиться в работах [25, 27, 29]. Коэффициент полезного объема сырья задан формулами (10), (11). Примем, что $\varepsilon^{(1)}$ имеет равномерное распределение, поскольку нет информации о том, как изменяется рабочий объем сырья со временем.

При этом объем производимых товаров (12) также подвержен физическим ограничениям сверху.

Как следует из описания модели $F^{(1.1)}(e)$, она является задачей нелинейного и стохастического программирования. Для решения поставленной задачи необходимо рассмотреть алгоритм решения, который примет следующий вид:

1) разыграть значения (8), (9) и γ_{im} с учетом выражения (11);

2) решить задачу смешанно-целочисленного программирования (1) — (7), (12) для каждого набора данных e .

Калибровка. Тестирование модели было проведено, с одной стороны, на данных предприятия, расположенного в Приморском крае, с другой — сгенерированы авторами.

Рассмотрим, как сгенерированы данные, связанные с распределением лотов во времени. Для этого были взяты данные с товарно-сырьевой биржи за 120 дней, начиная с 01.02.2022. Каждые 30 дней выполняли расчет математического ожидания и дисперсии количества заявок, объемов сырья в каждой заявке и средней цены на 1 м^3 . Далее по нормальному закону с вычисленными характеристиками были сформированы E наборы данных. Остальные значения параметров логистики и производственных процессов (\bar{b} , \underline{b} , B_0 , FC , a_m , δ_m , β , L_r) были взяты с предприятия в соответствии с их оценками.

Для определенности используем $K = 4$ типов товаров, горизонт планирования длиной $M = 100$ дней, типы сырья $L = 2$, количество регионов $R = 4$, количество лотов каждый день в диапазоне $0 \leq I \leq 6$, количество различных наборов входных параметров $E = 400$. Биржа представлена четырьмя регионами: Иркутская область ($r = 1$), Пермский край ($r = 2$), Республика Бурятия ($r = 3$), Московская область ($r = 4$). Горизонт планирования лежит в интервале между 1 февраля 2022 г. и 15 мая 2022 г.

Основные входные данные, характеризующие предприятие, представлены в табл. 1, 2.

Для проведения вычислений были использованы высокоуровневый язык программирования MatLAB и встроенная функция `intlinprog` (MathWorks. Справочный центр. `intlinprog`. Смешанно-целочисленное линейное программирование (MILP). <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/intlinprog.html>) для поиска решения задач смешанно-целочисленной линейной оптимизации. Эта функция использует общий алгоритмический метод ветвей и границ.

Результаты и обсуждение

На рисунке изображен показатель прибыли в каждый отдельный день. Серым цветом обозначены

Т а б л и ц а 1

Основные входные параметры предприятия

Main input parameters of the enterprise

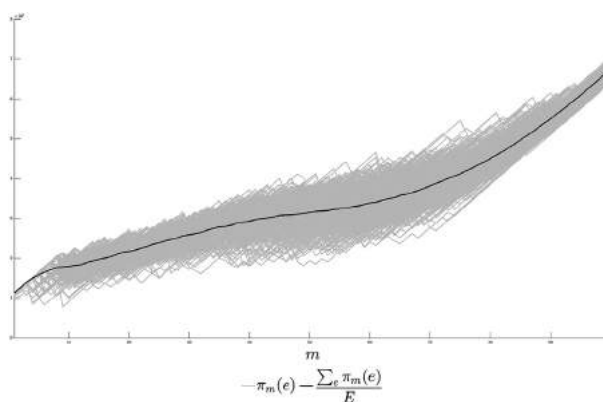
| Параметр | Значение |
|--|------------------------------------|
| $\forall m > 0: p_{km}, k = 1:K, \text{ руб.}$ | $(1, 1,39, 1,51, 1,61) \cdot 10^4$ |
| $\bar{b}, \text{ м}^3$ | 3000 |
| $\underline{b}, \text{ м}^3$ | 40 |
| $B_0, \text{ руб.}$ | $3 \cdot 10^6$ |
| $\text{left}(m), \text{ у. е.}$ | $\frac{100}{m \cdot 10^5}$ |
| $\text{right}(m), \text{ у. е.}$ | $\frac{100}{m \cdot 10^5}$ |
| $\forall m, k > 0: H_{km}$ | 4 |
| $L_r, r = 1:R, \text{ км}$ | (3740, 7560, 3250, 9030) |

Т а б л и ц а 2

Затраты сырья на производство единицы товара по предприятию

Raw material costs for the production of a unit of goods by the enterprise

| A_{lk} | $k = 1$ | $k = 2$ | $k = 3$ | $k = 4$ |
|----------|---------|---------|---------|---------|
| $l = 1$ | 2 | 3 | 4 | 3 |
| $l = 2$ | 1 | 3 | 3 | 5 |



Визуализация значений прибыли: серым цветом — траектории прибыли при работе модели над каждым из ее наборов данных; черным — усредненное значение траекторий прибыли (скриншот)

Visualisation of profit values: grey — profit paths when the model works on each of its data sets; black — average value of profit paths (screenshot)

объемы прибыли для каждого отдельного набора данных, черным — среднее значение. Наиболее финансово сложный период приходится на 40...60 дни планирования — показатель прибыли при оптимальном решении почти стабилизируется и не изменяется, что позволяет утверждать о сложности рассматриваемого периода, с точки зрения управленческого подхода.

Рассмотрим положительные и отрицательные стороны полученной модели.

Отрицательные стороны

В реальных условиях планирования производства чрезвычайно сложно представить себе ситуацию, в которой менеджеры, принимающие решения, обладают всем объемом информации о фактическом распределении лотов во времени с учетом всех их характеристик. Поэтому важно иметь разнообразные данные, относящиеся к поставленным задачам, за продолжительный период времени. На веб-сайте биржи представлены данные лишь с начала 2010-х годов, что осложняет задачу сбора достаточно большой выборки данных для последующего анализа. Важно, что со временем эта проблема теряет актуальность, поскольку объем отчетов о совершенных сделках растет. По теории аукционов прогнозирование ситуаций на биржах представляет собой сложную задачу, поскольку влияние перемен на биржах усиливается с появлением частных инвесторов (в данной задаче — небольших предприятий), и эти перемены трудно поддаются точному прогнозированию. Исходя из этого актуальность приобретает разработка методов прогнозирования ситуаций на биржах не только для ценных бумаг, но и для сырьевых товаров. Возрастающее количество ограничений из-за линейной природы модели делает ее сложной для решения [24]. Не существует четкого объяснения целесообразности использования логнормального распределения для описания пройденного лотом расстояния.

Положительные стороны

Для оценки прибыльности производства по различным его масштабам, включая даже такую крупную компанию лесной отрасли, как, например, «Segezha Group» — одну из крупнейших компаний лесопромышленного сектора в России, данную модель можно применить при крупных объемах сырья, лотов и большом числе регионов на бирже. Эффективный горизонт планирования составляет один год. Это наиболее распространенный срок на предприятиях данной отрасли [23–26]. Преимущество модели заключается в ее концептуальной простоте. Модель способна учесть время, необходимое для перемещения лота от поставщика к покупателю. Важным аспектом является наличие коэффициента полезного объема сырья для производственных целей. Модель использует известные методы оптимизации для решения задач линейного программирования, что облегчает ее применение [29].

Выводы

Созданная модель предназначена для определения верхней границы прибыли компаний лесопромышленной отрасли и определяет время в пути лотов и их полезный объем. С ее помощью можно строить оптимальные цепочки поставок с

учетом сырьевых ресурсов и объемов производства, соблюдая бюджет предприятия. Решение, полученное с помощью модели, охватывает производственные процессы, денежные потоки, логистические маршруты и уровень запасов. Этим инструментом могут воспользоваться топ-менеджеры лесопромышленной отрасли.

Апробация разработанной модели на лесоперерабатывающем предприятии позволила выработать рекомендации по взаимодействию с товарно-сырьевой биржей. Согласно анализу, закупка сырья из Московской области и Пермского края может оказаться эффективной, несмотря на географическую близость других регионов. В то же время приобретение сырья из Иркутской области и Республики Бурятия рекомендуется рассматривать с учетом конкретных условий. Расчеты подтверждают, что совершение разумных сырьевых сделок на российской бирже вполне осуществимо.

Список литературы

- [1] Tsay A.A., Agrawal N. Channel dynamics under price and service competition // *Manufacturing & Service Operations Management*, 2000, no. 2, pp. 372–391.
- [2] Tsay A.A., Agrawal N. Channel conflict and coordination in the e-commerce age // *Production and Operations Management*, 2004, no. 13, pp. 93–110.
- [3] Bernstein F., Federgruen A. A general equilibrium model for industries with price and service competition // *Operations Research*, 2004, no. 52, pp. 868–886.
- [4] Yao D.Q., Yue X., Liu J. Vertical cost information sharing in a supply chain with value-adding retailers // *Omega*, no. 36, pp. 838–851.
- [5] Xiao T., Yang D. Price and service competition of supply chains with risk-averse retailers under demand uncertainty // *International J. of Production Economics*, 2008, no. 114, pp. 187–200.
- [6] Wu D. Joint pricing-servicing decision and channel strategies in the supply chain // *Central European Journal of Operations Research*, 2011, no. 19, 99–137.
- [7] Wu C.H. Price and service competition between new and remanufactured products in a two-echelon supply chain // *International J. of Production Economics*, 2012, no. 140, pp. 496–507.
- [8] Rezapour S., Farahani R.Z. Supply chain network design under oligopolistic price and service level competition with foresight // *Computers & Industrial Engineering*, 2014, no. 72, pp. 129–142.
- [9] Ali S.M., Rahman M.H., Tumpa T.J., Rifat A.A.M., Paul S.K. Examining price and service competition among retailers in a supply chain under potential demand disruption // *J. of Retailing and Consumer Services*, 2018, no. 40, pp. 40–47.
- [10] Pi Z., Fang W., Zhang B. Service and pricing strategies with competition and cooperation in a dual-channel supply chain with demand disruption // *Computers & Industrial Engineering*, 2019, no. 138, article ID: 106130.
- [11] Bernstein F., Federgruen A. Pricing and replenishment strategies in a distribution system with competing retailers // *Operations Research*, 2003, no. 51, pp. 409–426.
- [12] Chen K., Xiao T. Pricing and replenishment policies in a supply chain with competing retailers under different retail

- behaviors // *Computers & Industrial Engineering*, 2017, no. 103, pp. 145–157.
- [13] Bernstein F., Federgruen A. Decentralized supply chains with competing retailers under demand uncertainty // *Management Science*, 2005, no. 51, pp. 18–29.
- [14] Cachon G.P. Stock wars: inventory competition in a two-echelon supply chain with multiple retailers // *Operations Research*, 2001, no. 49, pp. 658–674.
- [15] Anderson E.J., Bao Y. Price competition with integrated and decentralized supply chains // *European J. of Operational Research*, 2010, no. 200, pp. 227–234.
- [16] David A., Adida E. Competition and coordination in a two-channel supply chain // *Production and Operations Management*, 2015, no. 24, pp. 1358–1370.
- [17] Adida E., DeMiguel V. Supply chain competition with multiple manufacturers and retailers // *Operations Research*, 2011, no. 59, pp. 156–172.
- [18] Konur D., Geunes J. Supplier wholesale pricing for a retail chain: implications of centralized vs. decentralized retailing and procurement under quantity competition // *Omega*, 2016, no. 65, pp. 98–110.
- [19] Shenoy P.P. Competitive inventory models // *RAIRO-Operations Research*, 1987, no. 21, pp. 1–19.
- [20] Yang S.L., Zhou Y.W. Two-echelon supply chain models: considering duopolistic retailers' different competitive behaviors // *International J. of Production Economics*, 2006, no. 103, pp. 104–116.
- [21] Zhang P., He Y., Shi C.V. Transshipment and coordination in a two-echelon supply chain // *RAIRO-Operations Research*, 2017, no. 51, pp. 729–747.
- [22] Yan X., Zhao H. Inventory sharing and coordination among n independent retailers // *European J. of Operational Research*, 2015, no. 243, pp. 576–587.
- [23] Рогулин Р.С., Мазелис Л.С. Алгоритм и математическая модель формирования устойчивых цепочек поставок древесного сырья из регионов России: сравнение и анализ // *Вестник Пермского университета. Серия «Экономика»*, 2020. № 3 (15). С. 385–404.
- [24] Berglof E., Foray D., Landesmann M., Lin J. Y., Campos M. N., Sanfey P., Radosevic S., Volchkova N. Transition economics meets new structural economics // *J. of Economic Policy Reform*, 2015, v. 18, no. 3, pp. 191–220.
- [25] Di Meglio G., Gallego J., Maroto A., Savona M. Services in developing economies: A new chance for catching-up? // *SPRU Working Paper Series*, 2015, no. 2015–32, pp. 1–33.
- [26] Felipe J., Mehta A. Deindustrialization? A global perspective // *Economics Letters*, 2016, v. 149, pp. 148–151.
- [27] Gouvea R., Lima G. Balance of payments constrained growth in a multisectoral framework: A panel data investigation // *J. of Economic Studies*, 2013, v. 40, no. 2, pp. 240–254.
- [28] Romano L., Trau F. The nature of industrial development and the speed of structural change // *Structural Change and Economic Dynamics*, 2017, v. 42, pp. 26–37.
- [29] Mazelis L., Rogulin R. Devising a method for the formation of sustainable chains of supply of raw materials from mercantile exchange to a timber processing enterprise considering uncertainties and risks // *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*, 2021, no. 5, pp. 6–18.
- [30] Тарасов В.Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. М.: Эдиториал УРСС, 2002. 352 с.
- [31] Канторович Л.В. Математические методы организации и планирования производства. Л.: Изд-во ЛГУ, 1939. 304 с.
- [32] Shao J., Krishnan H., McCormick S.T. Incentives for transshipment in a supply chain with decentralized retailers // *Manufacturing & Service Operations Management*, 2011, no. 13, pp. 361–372.
- [33] Huang H., Ke H., Wang L. Equilibrium analysis of pricing competition and cooperation in supply chain with one common manufacturer and duopoly retailers // *International J. of Production Economics*, 2016, no. 178, pp. 12–21.
- [34] Glock C.H., Kim T. The effect of forward integration on a single-vendor-multi-retailer supply chain under retailer competition // *International J. of Production Economics*, 2015, no. 164, pp. 179–192.
- [35] Chen K., Xiao T. Pricing and replenishment policies in a supply chain with competing retailers under different retail behaviors // *Computers & Industrial Engineering*, 2017, no. 103, pp. 145–157.
- [36] Karimi M., Khademi-Zare H., Zare-Mehrjerdi Y., Fakhrazad M. B. Optimizing service level, price, and inventory decisions for a supply chain with retailers' competition and cooperation under VMI strategy // *RAIRO-Operations Research*, 2022, no. 56, pp. 1051 – 1078.

Сведения об авторе

Рогулин Родион Сергеевич — канд. экон. наук, доцент кафедры «Математика и моделирование», Владивостокский государственный университет, rafassiaofusa@mail.ru

Поступила в редакцию 16.05.2023.

Одобрено после рецензирования 21.08.2023.

Принята к публикации 04.12.2023.

SOLVING PROBLEM OF FORMING RAW MATERIAL SUPPLY CHAINS FOR WOOD ENTERPRISES FROM COMMODITY EXCHANGE WITH DETERMINISTIC PARAMETERS

R.S. Rogulin

Vladivostok state university, 41, Gogol st., 690014, Vladivostok, Russia

rafassiaofusa@mail.ru

Significant aspects related to the problems of forming supply chains and production volumes at forest processing enterprises are considered. The main attention is paid to the problem of assessing the optimality of decisions made. The study analyzes forestry enterprises that do not have their own sources of raw materials and seek to find the optimal solution based on information about transactions on the commodity exchange that have already been carried out. A mathematical model has been developed that takes into account the share of the useful volume of raw materials, the time spent on transportation, and uncertainties. To test the effectiveness of the model, data from the exchange and enterprises located in the Primorsky Territory were used. Thanks to this, it was possible to determine the optimal path for obtaining profit, production volume and other important indicators. The issues of planning supply chains and production volumes are discussed, the regions that source raw materials are analyzed, and the advantages and disadvantages of the proposed mathematical model are given. The results obtained can be used to carry out rational transactions on the Russian Commodity and Raw Materials Exchange and are of interest to top management of forestry enterprises that seek to improve the efficiency of their activities.

Keywords: supply chains, calculation of production of goods, timber processing enterprises, commodity exchange, share of the useful volume of raw materials, time of lots in transit

Suggested citation: Rogulin R.S. *Reshenie zadachi formirovaniya tsepochek postavok syr'ya lesopromyshlennykh predpriyatiy s tovarno-syr'evoy birzhi s determinirovannymi parametrami* [Solving problem of forming raw material supply chains for wood enterprises from commodity exchange with deterministic parameters]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 2, pp. 166–174. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-166-174

References

- [1] Tsay A.A., Agrawal N. Channel dynamics under price and service competition. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2000, no. 2, pp. 372–391.
- [2] Tsay A.A., Agrawal N. Channel conflict and coordination in the e-commerce age. *Production and Operations Management*, 2004, no. 13, pp. 93–110.
- [3] Bernstein F., Federgruen A. A general equilibrium model for industries with price and service competition. *Operations Research*, 2004, no. 52, pp. 868–886.
- [4] Yao D.Q., Yue X., Liu J. Vertical cost information sharing in a supply chain with value-adding retailers. *Omega*, no. 36, pp. 838–851.
- [5] Xiao T., Yang D. Price and service competition of supply chains with risk-averse retailers under demand uncertainty. *International J. of Production Economics*, 2008, no. 114, pp. 187–200.
- [6] Wu D. Joint pricing-servicing decision and channel strategies in the supply chain. *Central European J. of Operations Research*, 2011, no. 19, pp. 99–137.
- [7] Wu C.H. Price and service competition between new and remanufactured products in a two-echelon supply chain. *International J. of Production Economics*, 2012, no. 140, pp. 496–507.
- [8] Rezapour S., Farahani R.Z. Supply chain network design under oligopolistic price and service level competition with foresight. *Computers & Industrial Engineering*, 2014, no. 72, pp. 129–142.
- [9] Ali S.M., Rahman M.H., Tumpa T.J., Rifat A.A.M., Paul S.K. Examining price and service competition among retailers in a supply chain under potential demand disruption. *J. of Retailing and Consumer Services*, 2018, no. 40, pp. 40–47.
- [10] Pi Z., Fang W., Zhang B. Service and pricing strategies with competition and cooperation in a dual-channel supply chain with demand disruption. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, no. 138, article ID: 106130.
- [11] Bernstein F., Federgruen A. Pricing and replenishment strategies in a distribution system with competing retailers. *Operations Research*, 2003, no. 51, pp. 409–426.
- [12] Chen K., Xiao T. Pricing and replenishment policies in a supply chain with competing retailers under different retail behaviors. *Computers & Industrial Engineering*, 2017, no. 103, pp. 145–157.
- [13] Bernstein F., Federgruen A. Decentralized supply chains with competing retailers under demand uncertainty. *Management Science*, 2005, no. 51, pp. 18–29.
- [14] Cachon G.P. Stock wars: inventory competition in a two-echelon supply chain with multiple retailers. *Operations Research*, 2001, no. 49, pp. 658–674.
- [15] Anderson E.J., Bao Y. Price competition with integrated and decentralized supply chains. *European J. of Operational Research*, 2010, no. 200, pp. 227–234.
- [16] David A., Adida E. Competition and coordination in a two-channel supply chain. *Production and Operations Management*, 2015, no. 24, pp. 1358–1370.
- [17] Adida E., DeMiguel V. Supply chain competition with multiple manufacturers and retailers. *Operations Research*, 2011, no. 59, pp. 156–172.

- [18] Konur D., Geunes J. Supplier wholesale pricing for a retail chain: implications of centralized vs. decentralized retailing and procurement under quantity competition. *Omega*, 2016, no. 65, pp. 98–110.
- [19] Shenoy P.P. Competitive inventory models. *RAIRO-Operations Research*, 1987, no. 21, pp. 1–19.
- [20] Yang S.L., Zhou Y.W. Two-echelon supply chain models: considering duopolistic retailers' different competitive behaviors. *International J. of Production Economics*, 2006, no. 103, pp. 104–116.
- [21] Zhang P., He Y., Shi C.V. Transshipment and coordination in a two-echelon supply chain. *RAIRO-Operations Research*, 2017, no. 51, pp. 729–747.
- [22] Yan X., Zhao H. Inventory sharing and coordination among n independent retailers. *European J. of Operational Research*, 2015, no. 243, pp. 576–587.
- [23] Rogulin R.S., Mazelis L.S. *Algoritm i matematicheskaya model' formirovaniya ustoychivyykh tsepohek postavok drevsnogo syr'ya iz regionov Rossii: sravnenie i analiz* [Algorithm and mathematical model for the formation of sustainable supply chains of wood raw materials from Russian regions: comparison and analysis]. *Vestnik Permskogo universiteta. Seriya «Ekonomika»* [Bulletin of Perm University. Series «Economics»], 2020, no. 3 (15), pp. 385–404.
- [24] Berglof E., Foray D., Landesmann M., Lin J. Y., Campos M. N., Sanfey P., Radosevic S., Volchkova N. Transition economics meets new structural economics. *J. of Economic Policy Reform*, 2015, v. 18, no. 3, pp. 191–220.
- [25] Di Meglio G., Gallego J., Maroto A., Savona M. Services in developing economies: A new chance for catching-up?. *SPRU Working Paper Series*, 2015, no. 2015–32, pp. 1–33.
- [26] Felipe J., Mehta A. Deindustrialization? A global perspective. *Economics Letters*, 2016, v. 149, pp. 148–151.
- [27] Gouvea R., Lima G. Balance of payments constrained growth in a multisectoral framework: A panel data investigation. *J. of Economic Studies*, 2013, v. 40, no. 2, pp. 240–254.
- [28] Romano L., Trau F. The nature of industrial development and the speed of structural change. *Structural Change and Economic Dynamics*, 2017, v. 42, pp. 26–37.
- [29] Mazelis L., Rogulin R. Devising a method for the formation of sustainable chains of supply of raw materials from mercantile exchange to a timber processing enterprise considering uncertainties and risks. *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*, 2021, no. 5, pp. 6–18.
- [30] Tarasov V.B. *Ot mnogoagentnykh sistem k intellektual'nykh organizatsiyam: filozofiya, psikhologiya, informatika* [From multi-agent systems to intelligent organizations: philosophy, psychology, computer science]. Moscow: Editorial URSS, 2002, 352 p.
- [31] Kantorovich L. V. *Matematicheskie metody organizatsii i planirovaniya proizvodstva* [Mathematical methods of organization and production planning]. Leningrad: Leningrad State University, 1939, 304 p.
- [32] Shao J., Krishnan H., McCormick S.T. Incentives for transshipment in a supply chain with decentralized retailers. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2011, no. 13, pp. 361–372.
- [33] Huang H., Ke H., Wang L. Equilibrium analysis of pricing competition and cooperation in supply chain with one common manufacturer and duopoly retailers. *International J. of Production Economics*, 2016, no. 178, pp. 12–21.
- [34] Glock C.H., Kim T. The effect of forward integration on a single-vendor–multi-retailer supply chain under retailer competition. *International J. of Production Economics*, 2015, no. 164, pp. 179–192.
- [35] Chen K., Xiao T. Pricing and replenishment policies in a supply chain with competing retailers under different retail behaviors. *Computers & Industrial Engineering*, 2017, no. 103, pp. 145–157.
- [36] Karimi M., Khademi-Zare H., Zare-Mehrjerdi Y., Fakhrazad M. B. Optimizing service level, price, and inventory decisions for a supply chain with retailers' competition and cooperation under VMI strategy. *RAIRO-Operations Research*, 2022, no. 56, pp. 1051 – 1078.

Author's information

Rogulin Rodion Sergeevich — Cand. Sci. (Economic), Associate Professor of the Department «Mathematics and Modeling», Vladivostok State University, rafassiaofusa@mail.ru

Received 16.05.2023.

Approved after review 21.08.2023.

Accepted for publication 04.12.2023.