

ЛЕСНОЙ ВЕСТНИК / FORESTRY BULLETIN

Научно-информационный журнал

№ 5 ' 2024 Том 28

Главный редактор

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

Редакционный совет журнала

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

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

Ответственный секретарь Расева Елена Александровна

Редактор Л.В. Сивай

Перевод М.А. Карлухиной

Электронная версия Ю.А. Ражской

Учредитель МГТУ им. Н.Э. Баумана

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

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-68118 от 21.12.2016

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

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

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

Дата выхода в свет 08.10.2024

Тираж 600 экз.

Заказ №

Объем 20,75 п. л.

Цена свободная

LESNOY VESTNIK / FORESTRY BULLETIN

Scientific Information journal

No. 5 ' 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 08.10.2024
Circulation 600 copies
Order №
Volume 20,75 p. p.
Price free

СОДЕРЖАНИЕ

ЛЕСОВЕДЕНИЕ, ЛЕСОВОДСТВО И ТАКСАЦИЯ ЛЕСА

- Усолецев В.А., Плюха Н.И., Цепордей И.С.**
Региональные особенности базисной плотности запаса стволовой древесины
в коре у лиственных древесных видов Евразии 5
- Глушко С.Г., Прохоренко Н.Б.**
Лесовосстановительные сукцессии и основы их современной систематизации 19
- Феклистов П.А., Бруева Ж.А., Верховцева Е.П., Болотов И.Н.**
Особенности микроклимата под пологом северотаежных сосняков разных типов леса 30
- Поздеев Д.А., Абсалямов Р.Р., Якимов М.В.**
Сравнительный анализ ширины годичных колец деревьев в березняках
и ельниках Увинского лесничества (Удмуртская Республика) 42

ЛЕСНЫЕ КУЛЬТУРЫ, СЕЛЕКЦИЯ И ГЕНЕТИКА

- Коновалова Д.А., Братилова Н.П., Мантулина А.В., Коротков А.А.**
Рост семян сосны кедровой сибирской с закрытой корневой системой на экспериментальных субстратах 55
- Мельник П.Г.**
Рост, продуктивность и сохранность климатипов сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.)
в условиях Мещёрской низменности 68
- Третьякова Р.А., Паркина О.В., Роговцев Р.В., Якубенко О.Е.**
Оценка плюсовых деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) 83
- Крахмалева И.Л., Королева О.В., Молканова О.И.**
Особенности регенерации и укоренения сортов крыжовника обыкновенного *Ribes uva-crispa* L.
в культуре *in vitro* 94

ЭКОЛОГИЯ И ЗАЩИТА ЛЕСА

- Морковина С.С., Харченко Н.Н., Шешнищан С.С.,
Панявина Е.А., Иванова А.В., Водолажский А.И.**
Эколого-экономическая оценка результативности комплекса лесохозяйственных практик
в вопросах поддержания углеродного баланса 104
- Чалкин А.А., Лябзина С.Н., Кулинич О.А.**
Изучение направления разлета *Ips typographus* (Linnaeus, 1758)
с помощью люминесцентного порошка 118

БИОЛОГИЧЕСКАЯ РЕКУЛЬТИВАЦИЯ И МОНИТОРИНГ ЛЕСНЫХ ЗЕМЕЛЬ

- Горбунова В.Д., Менщиков С.Л.**
Связь содержания поллютантов в листьях березы повислой с жизненным состоянием древостоя
на примере АО «Карабашмедь» 129
- Велисевич С.Н., Попов А.В., Мельник М.А., Горошкевич С.Н.**
Влияние поздних весенних заморозков на плодоношение кедрового сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour)
в изменяющемся климате 138

ЛЕСНАЯ БИОТЕХНОЛОГИЯ

- Казаков Я.В., Бабич Н.А., Крушевская Н.А.**
Изменение структурно-морфологических свойств сульфатной целлюлозы
из древесины интродуцированной сосны скрученной при размоле 153

CONTENTS

SYLVICULTURE, FORESTRY AND FOREST ESTIMATION

- Usoltsev V.A., Plyukha N.I., Tsepordey I.S.**
Regional features of hardwoods trunk timber stock basic density in bark within Eurasia 5
- Glushko S.G., Prokhorenko N.B.**
Reforestation successions research and its modern systematization basics 19
- Feklistov P.A., Brueva Zh.A., Verkhovtseva E.P., Bolotov I.N.**
Microclimate features under canopy of north taiga pine forests of different types 30
- Pozdeev D.A., Absalyamov R.R., Yakimov M.V.**
Comparative analysis of annual tree rings width for birch groves
and spruce forests in Uvinsky forestry (Udmurt Republic) 42

FOREST CROPS, BREEDING AND GENETICS

- Konovalova D.A., Bratilova N.P., Mantulina A.V., Korotkov A.A.**
Siberian stone pine seedlings growth with root-balled tree system on experimental substrates 55
- Mel'nik P.G.**
Growth, productivity and preservation of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) climatypes
in Meshchera lowland conditions 68
- Tretyakova R.A., Parkina O.V., Rogovtsev R.V., Yakubenko O.E.**
Plus pine (*Pinus sylvestris* L.) trees evaluation 83
- Krakhmaleva I.L., Koroleva O.V., Molkanova O.I.**
Regeneration and rooting features of *Ribes uva-crispa* L. cultivars *in vitro* 94

ECOLOGY AND FOREST PROTECTION

- Morkovina S.S., Kharchenko N.N., Sheshnitsian S.S.,
Panyavina E.A., Ivanova A.V., Vodolazhskiy A.I.**
Ecological and economic assessment of forestry practices efficiency in maintaining carbon balance 104
- Chalkin A.A., Lyabzina S.N., Kulinich O.A.**
Research of *Ips typographus* (Linnaeus, 1758) flight behavior using luminescent powder 118

BIOLOGICAL RECULTIVATION AND MONITORING OF FOREST LANDS

- Gorbunova V.D., Menshchikov S.L.**
Connection between pollutant content in silver birch leaves and stand vital state at JSC «Karabashmed» 129
- Velisevich S.N., Popov A.V., Mel'nik M.A., Goroshkevich S.N.**
Influence of late spring light frosts on Siberian stone pine (*Pinus sibirica* Du Tour)
seed production in changing climate 138

FOREST BIOTECHNOLOGY

- Kazakov Ya.V., Babich N.A., Krushevskaya N.A.**
Kraft pulp structural and morphological property changes produced
from refined introduced Lodgepole pine wood 153

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ БАЗИСНОЙ ПЛОТНОСТИ ЗАПАСА СТВОЛОВОЙ ДРЕВЕСИНЫ В КОРЕ У ЛИСТВЕННЫХ ДРЕВЕСНЫХ ВИДОВ ЕВРАЗИИ

В.А. Усольцев^{1, 2✉}, Н.И. Плюха¹, И.С. Цепордей²

¹ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», Россия, 620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, д. 37

²ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук», Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202а

Usoltsev50@mail.ru

Проведен анализ региональных особенностей базисной плотности запаса стволовой древесины в коре у лиственных древесных видов Евразии. По полученным данным (2741 дерево шести лиственных древесных родов (видов) Евразии) разработаны регрессионные модели смешанного типа для базисной плотности запаса стволовой древесины в коре, специфичные по кластерам, представляющим регионы в пределах рода, виды и происхождение древостоев в пределах региона. Структура модели смешанного типа позволяет выполнить ранжирование кластеров по базисной плотности запаса стволовой древесины в коре при условии их равенства по возрасту деревьев (за исключением родов *Betula* и *Populus*, у которых возраст дерева в моделях статистически незначим). Выполнены два ранжирования по величине базисной плотности запаса стволовой древесины в коре, а именно, ранжирование кластеров в пределах рода (для бука лесного — в пределах вида) и видоспецифичное ранжирование, согласно которому максимальным значением характеризуется бук лесной и минимальным — тополь черный. Полученные модели и ранжирования видов по величине базисной плотности запаса стволовой древесины в коре могут быть использованы при расчетах углеродного пула в лиственных древостоях по данным инвентаризации лесов.

Ключевые слова: лесообразующие виды Евразии, базисная плотность запаса стволовой древесины, регрессионные модели смешанного типа, ранжирования видов

Ссылка для цитирования: Усольцев В.А., Плюха Н.И., Цепордей И.С. Региональные особенности базисной плотности запаса стволовой древесины в коре у лиственных древесных видов Евразии // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 5. С. 5–18. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-5-18

Увеличение количества опубликованных научных работ и расширение доступности к полученным результатам в мировом масштабе привели к быстрому накоплению объема данных, что обусловило вступление научного сообщества исследователей в области экологии в «эру больших данных» [1]. Это предоставляет экологическому сообществу возможности для решения актуальных проблем современности в беспрецедентных временных и пространственных масштабах [2, 3]. Одна из подобных баз данных (представляемая как «база баз данных») [4] создана в целях документирования функционального разнообразия растений, ознакомления биологов с широким набором признаков растений и предоставления открытого доступа к данным, которые могут быть решающими в эпоху глобальных изменений. Она содержит 12 млн записей о физиологических, морфологических, анатомических и фенологических признаках растений для 280 тыс. видов по всему миру.

При хозяйственном использовании стволовая древесина оценивается в единицах объема, однако

для более широкой и объективной оценки ее фитомассы и углерододепонирующей способности стволовой древесины необходимо ее оценивать в единицах массы. Во избежание повторных измерений при определении фитомассы следует знать базисную плотность (БП) (basic density) древесины [5].

Известно, что древесина состоит из клеточных стенок и пустотных пространств. Клеточные стенки древесины имеют примерно одинаковую БП, независимо от древесного вида — около 1,56 т/м³, и, таким образом, БП древесины как отношение массы абсолютно сухой древесины к ее объему в свежем состоянии зависит от соотношения объемов, занимаемых клеточными стенками и межклеточным пространством. Наряду с БП древесины, применяется показатель удельного веса (specific gravity) как отношение абсолютно сухой массы к занимаемому объему воды, 1 м³ которой имеет массу 1 т. Если БП древесины составляет 400 кг/м³, то удельный вес — 0,40 кг/м³. Тем не менее разница между удельным весом и БП древесины может достигать от –2 до +1 % [6].

В большинстве публикаций БП древесины оценивается в абсолютно сухом состоянии,

однако некоторые работы приводят оценки БП древесины при влажности 12 % [7, 8]. При использовании опубликованных средних значений БП древесины или ее удельного веса по тому или иному древесному виду для перевода объема древесины в показатели массы важно знать, был ли получен объем в свежем (т. е. до усушки) или в сухом состоянии (после усушки). Разница объемов в свежем и сухом состоянии достигает в среднем 10 % у хвойных и 15 % у лиственных видов, иногда от 7 до 20 % и более. В целом БП древесины, оцененная по объему древесины в свежем состоянии, преимущественнее, поскольку применима к объему ствола растущего дерева без необходимости наличия данных об объемной усушке [9].

Характеристики качества древесины, в том числе показатели ее БП, включены в программы по селекции древесных видов в разных странах [8, 10–16]. Базисная плотность древесины может служить показателем устойчивости того или иного вида к засухам [17] и опосредованно через связь с относительной высотой ствола — показателем устойчивости к ветровалам [18–20]. Наличие стволовой гнили существенно снижает базисную плотность и, соответственно, содержание углерода в древесине [21].

Развитие методов неразрушающего контроля квалитетических показателей древесины растущих деревьев дает возможность получить массовые данные о БП древесины и других ее характеристиках [22, 23]. Анализ древесины в спектре ближнего (ИК-диапазон) показал возможность прогнозирования БП древесины с коэффициентом детерминации модели для тропических видов Бразилии от 0,87 до 0,93 [24], для хвойных и лиственных Канады — от 0,83 до 0,93 [25] и для лиственницы европейской в Англии — до 0,98 [26].

На мировом уровне БП древесины изменяется от 290 до 540 кг/м³ у хвойных и от 100 до 1300 кг/м³ у остальных видов, причем большинство их попадают в диапазон от 320 до 720 кг/м³ [9, 27]. У некоторых лиственных видов Словакии БП древесины и коры изменяется в диапазонах соответственно от 440 до 650 кг/м³ и от 380 до 670 кг/м³, а у некоторых хвойных — соответственно от 373 до 508 кг/м³ и от 333 до 551 кг/м³ [5]. У некоторых древесных видов Бразилии БП древесины изменяется в пределах от 350 до 850 кг/м³ [28].

Базисная плотность древесины может различаться у видов в пределах одного рода, например, составлять 586 и 627 кг/м³ соответственно у дуба скального и австрийского с ареалом в Венгрии [5]. У 470 родов в глобальных масштабах была исследована линейная связь БП древесины, различающейся между видами в пределах рода, со средним значением для рода, что объяснило 62 % варьирования БП древесины видов [29].

Видовая специфика формирования БП древесины и коры обусловила абсолютно разные ранжирования некоторых лиственных видов Словакии по значению БП древесины и коры [5]. Различные порядки ранжирования БП древесины и коры были выявлены также у некоторых лесобразующих видов Евразии [30, 31].

Базисная плотность древесины зависит не только от ее влажности, но и от других физико-технических и механических свойств [7, 23, 32–36]. Возрастное замедление радиального прироста стволов деревьев, как установлено, обуславливает увеличение БП древесины в радиальном направлении — от сердцевины к коре [20, 37–39], однако это характерно не для всех древесных видов [20, 40]. В частности, у ольхи серой и черной БП древесины увеличивается в направлении от основания к вершине ствола [41], тогда как у эвкалипта, сосны обыкновенной и сосны карибской, лиственницы европейской и курателлы американской (*Curatella americana* L.) в таком же направлении она снижается [35, 42–44], у березы повислой, бука лесного, ясеня обыкновенного и 140-летней ели европейской четкая закономерность вообще не обнаружена [26, 37, 43].

Выявлены существенные изменения БП древесины вследствие влияния на деревья различных факторов окружающей среды [32, 45–50], в том числе климатических [31, 51], а также в зависимости от возраста дерева, диаметра его ствола, ширины годичного кольца, доли поздней древесины и других эндогенных и экзогенных показателей [18, 34, 44, 49, 52–56]. Зависимость БП древесины от диаметра ствола может быть как отрицательной [19, 36, 57], так и положительной [19, 55–58]. Использование в качестве предиктора БП древесины диаметра ствола без учета других параметров может давать низкий коэффициент детерминации и объяснять лишь от 5 до 7 % ее общей изменчивости [19, 55].

Современные технологии позволяют осуществлять производство древесно-стружечных плит из древесины и коры любых древесных видов без снижения качества продукции [59]. В силу технологической специфики деревообрабатывающих производств в Японии [60] вся японская литература, посвященная оценке фитомассы деревьев и древостоев, начиная с 1950 г. по настоящее время, содержит данные о массе (и очень редко об объеме) стволов без разделения на древесину и кору [61].

Практически во всех литературных источниках, содержащих информацию о квалитетических свойствах древесины, приводится информация только о БП собственно древесины и очень редко о БП как древесины, так и коры, и показано

их существенное различие [5, 23, 30]. В работе К. Лиепиньша и соавторов [41] приводятся данные о БП древесины ольхи вместе с корой, что является редким исключением в сложившейся ситуации. Если необходимо рассчитать биомассу стволовой древесины в коре по имеющимся данным объемов на основе БП древесины, различающихся для древесины и коры, то получить искомый результат с достаточной точностью невозможно, поскольку в каждом конкретном случае неизвестно соотношение древесины и коры. Насколько нам известно, исследования БП стволовой древесины в коре для различных древесных видов в литературе отсутствуют.

Цель работы

Цель работы — разработка регрессионных моделей смешанного типа для базисной плотности запаса стволовой древесины в коре, специфичных по регионам и древесным видам.

Объекты и методы исследования

Источником исходных материалов для регрессионного моделирования послужили база данных о квалитетических показателях древесных видов Центральной Евразии [62] и последняя версия базы данных о фитомассе деревьев лесобразующих видов Евразии [61]. Сформирована выборка из 2741 дерева шести лиственных древесных родов (видов) Евразии (табл. 1).

Поскольку ни один вид не распространен по всей территории Евразии, викарирующие виды того или иного древесного рода представлены в отдельных регионах. В пределах регионов у некоторых видов рассматривается БП древесины стволов, подразделенная на типы в зависимости от происхождения древостоя (семенного, порослевого, искусственного). Размер выборок по видам различается — от 237 наблюдений для лип до 948 для берез. Количество выделяемых регионов и видов в пределах региона также разное — от 4 для бука лесного до 12 для берез. То и другое определяется главным образом шириной ареала исследуемого рода (вида). Однако немаловажное значение в разбиении исходных данных на анализируемые группы (кластеры) имеет степень наполненности упомянутых баз данных фактическим материалом.

В «идеальном» случае кластеризация исходных данных могла бы иметь следующий вид. В ареале древесного рода выделяются области произрастания составляющих его викарирующих видов, в пределах которых выявляются географические регионы произрастания каждого вида, и в каждом регионе определяются исходные данные по происхождению древостоев. Однако нынешняя структура баз данных не позволяет осуществить

подобную «идеальную» схему кластеризации. В действительности имеется абсолютно разнородная кластеризация исходных данных, которая зависит от степени заполнения «идеальной» схемы фактическими данными.

Например, для Южного Предуралья в пределах ареала липы мелколистной имеются фактические данные по БП древостоев семенного, порослевого и искусственного происхождения. В ареалах белых берез, скорее всего, произрастают древостои трех происхождений, однако фактические данные о БП древесины берез есть только для древостоев естественного происхождения. Получены данные о БП древесины трех видов берез (см. табл. 1) в пределах Приморья. Игнорировать деление показателей БП древесины липы по происхождению на основании невозможности выполнения того же самого для берез означает потерю информации по БП древесины липы. Точно так же нелогично объединять три вида берез в пределах Приморья на основании наличия в Приморье лишь одного вида липы.

Согласно проведенному анализу литературных источников, при исследовании зависимости БП древесины от дендрометрических показателей деревьев наиболее часто в качестве независимых переменных в модель включали возраст и диаметр ствола дерева. Высота дерева рассматривалась реже по причине ее корреляции с возрастом. Поскольку одной из целей данного исследования является ранжирование древесных видов и родов по значению БП древесины, для каждого рода в отдельности была применена структура модели смешанного типа [30, 64], включающая в себя численные (возраст и диаметр ствола) и фиктивные переменные. Последние кодируют принадлежность данных БП древесины к тому или иному кластеру, дифференцированному по древесным видам и регионам, а в пределах ареала липы мелколистной — также по происхождению древостоя (см. табл. 1).

В итоге была принята следующая структура аллометрической модели смешанного типа

$$\ln(BD) = a_0 + b_1 \ln(A) + b_2 \ln(D) + \sum a_i X_i \quad (1)$$

где BD — базисная плотность (БП) стволовой древесины в коре, кг/м³;

A — возраст дерева, лет;

D — диаметр ствола на высоте 1,3 м от поверхности земли, см;

$\sum a_i X_i$ — блок фиктивных переменных в количестве $i + 1$;

a_0 — свободный член уравнения, скорректированный на логарифмическое преобразование данных;

b_1 и b_2 — регрессионные коэффициенты при численных переменных уравнения.

Отметим, что для классического регрессионного анализа численных переменных требуется равномерная матрица распределения данных во избежание смещений под влиянием разных «весов» (значимости). При использовании блока фиктивных переменных это требование теряет смысл, поскольку качественные (фиктивные) переменные имеют одинаковые «веса», независимо

от количества данных, приходящихся на каждую переменную.

Результаты и обсуждение

Как указано выше, зависимость БП древесины от диаметра ствола не является устойчивой: она может быть как положительной, так и отрицательной в связи с изменением доли ядра

Т а б л и ц а 1

Распределение 2741 измерения БП стволовой древесины в коре по регионам, видам и происхождению древостоев и схема их кодирования фиктивными переменными
Distribution of 2741 measurements of trunk timber basic density in bark by region, species and stand origin and their coding scheme with dummy variables

Регион (код)	Вид	Происхождение древостоя*	Число наблюдений	Географические координаты	Блок фиктивных переменных										
					X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁
Род <i>Betula</i> L. (948 наблюдений в десяти регионах)															
Северо-Запад России (СЗР)	<i>Betula pendula</i> Roth	е	–	–	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Украинское Полесье (УП)	<i>B. pendula</i>	е	–	–	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Центр Восточно-Европейской равнины (ЦВЕР)	<i>B. pendula</i>	е	–	–	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
Урал (Ур)	<i>B. pendula</i>	е	–	–	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
Тургайский прогиб (ТП)	<i>B. pendula</i>	е	–	–	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
Юг Западной Сибири (ЮЗС)	<i>B. pubescens</i> Ehrh.	е	–	–	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
Казахский мелкосопочник (КМ)	<i>B. pendula</i>	е	–	–	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
Средняя Сибирь (СС)	<i>B. pendula</i>	е	–	–	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
Восточный Хэнтэй Монголии (ВХМ)	<i>B. platyphylla</i> Suk.	е	–	–	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
Приморье 1 (ПРМ1)	<i>B. platyphylla</i>	е	–	–	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
Приморье 2 (ПРМ2)	<i>B. costata</i> Trautv.	е	–	–	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
Приморье 3 (ПРМ3)	<i>B. dahurica</i> Pall.	е	–	–	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
Род <i>Populus</i> L. (334 наблюдения в девяти регионах)															
Северо-Запад России (СЗР)	<i>Populus tremula</i> L.	ес	5	34,5° с. ш. 39,5° в. д.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Украинское Полесье (УП)	<i>P. tremula</i>	ес	49	51,4° с. ш. 30,7° в. д.	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Центр Восточно-Европейской равнины (ЦВЕР)	<i>P. tremula</i>	ес	4	55,7° с. ш. 36,7° в. д.	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
Средний Урал (СУ)	<i>P. tremula</i>	ес	3	56,8° с. ш. 59,5° в. д.	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
Оренбуржье (Ор)	<i>P. nigra</i> L.	к	7	51,7° с. ш. 54,8° в. д.	0	0	0	1	0	0	0	0	0	–	
Тургайский прогиб (ТП)	<i>P. tremula</i>	ес	38	53,2° с. ш. 64,0° в. д.	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
Юг Западной Сибири (ЮЗС)	<i>P. tremula</i>	еп	142	54,9° с. ш. 69,9° в. д.	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
Казахский мелкосопочник (КМ)	<i>P. tremula</i>	еп	79	52,6° с. ш. 70,4° в. д.	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
Приморье (ПРМ)	<i>P. davidiana</i> Dode	ес	7	43,6° с. ш. 132,2° в. д.	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	

Окончание табл. 1

Регион (код)	Вид	Происхождение древостоя*	Число наблюдений	Географические координаты	Блок фиктивных переменных										
					X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁
Род <i>Quercus</i> L. (451 наблюдение в шести регионах)															
Центральная Европа (ЦЕ)	<i>Quercus robur</i> L.	ес	16	47,5° с. ш. 8,8° в. д.	0	0	0	0	0	0	0	0			
Балканы (БАЛ)	<i>Q. longipes</i> Stev.	к	14	43,3° с. ш. 25,0° в. д.	1	0	0	0	0	0	0	0			
Украинское Полесье 1 (УП1)	<i>Q. robur</i>	ес	68	49,5° с. ш. 27,5° в. д.	0	1	0	0	0	0	0	0			
Украинское Полесье 2 (УП2)	<i>Q. robur</i>	к	10	51,5° с. ш. 32,0° в. д.	0	0	1	0	0	0	0	0			
Украинская лесостепь 1 (УЛ1)	<i>Q. robur</i>	ес	226	49,0° с. ш. 32,0° в. д.	0	0	0	1	0	0	0	0			
Украинская лесостепь 2 (УЛ2)	<i>Q. robur</i>	к	106	49,0° с. ш. 32,0° в. д.	0	0	0	0	1	0	0	0			
Центр Восточно-Европейской равнины (ЦВЕР)	<i>Q. robur</i>	ес	5	55,7° с. ш. 36,7° в. д.	0	0	0	0	0	1	0	0			
Приморье (ПРМ)	<i>Q. mongolica</i> F. ex L.	ес	6	43,6° с. ш. 132,2° в. д.	0	0	0	0	0	0	0	1			
Род <i>Tilia</i> L. (237 наблюдений в пяти регионах)															
Центральная Европа (ЦЕ)	<i>Tilia parvifolia</i> Ehrh.	ес	2	48,8° с. ш. 16,8° в. д.	0	0	0	0	0	0	0	0			
Центр Восточно-Европейской равнины (ЦВЕР)	<i>T. cordata</i> Mill.	ес	29	55,8° с. ш. 37,4° в. д.	1	0	0	0	0	0	0	0			
Средний Урал (СУ)	<i>T. cordata</i>	ес	4	56,8° с. ш. 59,5° в. д.	0	1	0	0	0	0	0	0			
Южное Предуралье 1 (ЮП1)	<i>T. cordata</i>	ес	7	54,7° с. ш. 56,0° в. д.	0	0	1	0	0	0	0	0			
Южное Предуралье 2 (ЮП2)	<i>T. cordata</i>	еп	124	54,8° с. ш. 55,7° в. д.	0	0	0	1	0	0	0	0			
Южное Предуралье 3 (ЮП3)	<i>T. cordata</i>	к	57	54,7° с. ш. 54,9° в. д.	0	0	0	0	1	0	0	0			
Приморье 1 (ПРМ1)	<i>T. amurensis</i> Rupr.	ес	7	43,6° с. ш. 132,2° в. д.	0	0	0	0	0	1	0	0			
Приморье 2 (ПРМ2)	<i>T. mandshurica</i> Rupr. & Maxim.	ес	7	43,6° с. ш. 132,2° в. д.	0	0	0	0	0	0	0	1			
Род <i>Alnus</i> Gaertn. (504 наблюдения в пяти регионах)															
Север Архангельской области (САО) [63]	<i>Alnus incana</i> (L.) Moench.	ес	22	48,8° с. ш. 16,8° в. д.	0	0	0	0	0	0	0	0			
Южная Карелия (ЮК)	<i>A. incana</i>	ес	5	55,8° с. ш. 37,4° в. д.	1	0	0	0	0	0	0	0			
Прибалтика (ПРБ)	<i>A. incana</i>	ес	8	56,8° с. ш. 59,5° в. д.	0	1	0	0	0	0	0	0			
Украинское Полесье (УП)	<i>A. glutinosa</i> (L.) Gaertn.)	ес	462	54,7° с. ш. 56,0° в. д.	0	0	1	0	0	0	0	0			
Приморье (ПРМ)	<i>A. hirsute</i> (Spach) T. ex R.	ес	7	54,8° с. ш. 55,7° в. д.	0	0	0	1	0	0	0	0			
Род <i>Fagus sylvatica</i> L. (267 наблюдений в четырех регионах)															
Западная Европа (ЗЕ)	<i>Fagus sylvatica</i> L.	ес	60	48,7° с. ш. 7,1° в. д.	0	0	0	0	0	0	0	0			
Центральная Европа (ЦЕ)	<i>F. sylvatica</i>	ес	22	51,5° с. ш. 16,7° в. д.	1	0	0	0	0	0	0	0			
Северная Европа (СЕ)	<i>F. sylvatica</i>	ес	2	56,0° с. ш. 12,2° в. д.	0	1	0	0	0	0	0	0			
Украинские Карпаты (УК)	<i>F. sylvatica</i>	ес	183	48,5° с. ш. 23,5° в. д.	0	0	1	0	0	0	0	0			

*Происхождение древостоя: ес — естественное семенное, к — культуры, еп — естественное порослевое.

у равновеликих деревьев. Оценка БП коры связана с другой неопределенностью — долей ритидома (корки) в общей массе коры. При оценке БП стволовой древесины в коре неопределенности, связанные по отдельности с древесиной и корой, накладываются одна на другую, что вызывает еще большую неопределенность. Это, по-видимому, послужило причиной того, связь БП древесины с диаметром ствола в модели (1) у разных родов имела разные знаки и, что более существенно, статистическая значимость диаметра как независимой переменной в большинстве случаев не обеспечивалась. Исключение составила БП ствола бука, у которого, как известно, корки нет. В итоге значимость диаметра ствола в этом случае была на уровне вероятности $p < 0,001$ ($t = 3,6 > t_{999} = 3,29$). Тем не менее для обеспечения консеквентности (логической последовательности) рассчитываемых моделей был исключен диаметр ствола из структуры моделей для всех видов и родов, и в окончательные расчеты БП древесины была включена их упрощенная структура

$$\ln(BD) = a_0 + b_1 \ln(A) + \sum a_i X_i. \quad (2)$$

Результаты моделирования (табл. 2) показали, что для родов *Betula* и *Populus* возраст дерева в качестве независимой переменной оказался не значимым ($t = 0,82 \dots 0,99 < t_{95} = 1,96$) и был исключен из структуры модели.

Путем графической интерпретации модели (2) выполнено ранжирование кластеров по величине БП стволовой древесины в коре (рис. 1).

Для родов *Quercus*, *Tilia*, *Alnus* и вида *Fagus sylvatica* в модели (2) предварительно были введены значения среднего возраста деревьев ($A = 40$ лет), рассчитанные по исходным данным.

Как следует из рис. 1, у рода *Betula* максимальным значением БП древесины стволов характеризуется береза плосколистная в Монголии и минимальным — береза повислая на Северо-Западе России. При этом происходит резкое снижение БП древесины в начале ряда в последовательности трех видов берез: плосколистная, повислая и даурская — соответственно с 620 до 541 кг/м³, а последующие кластеры в ряду распределения характеризуются сравнительно небольшим снижением: от березы ребристой в Приморье (536 кг/м³) до березы повислой на северо-западе России (482 кг/м³). У рода *Populus* максимальное значение БП древесины приходится на осину Северо-Запада России (513 кг/м³) и минимальное — на культуру тополя черного в Оренбуржье (327 кг/м³). При этом на основной части ряда распределения, приходящейся на осину, изменение БП древесины незначительное — от 430 кг/м³ на юге Западной Сибири до 400 кг/м³ на Среднем Урале.

Т а б л и ц а 2

Характеристика уравнений для базисной плотности стволовой древесины в коре
Equations characteristics for trunk timber basic density in bark

Независимые переменные	Обозначение	Зависимая переменная $\ln(BD)$					
		Род <i>Betula</i>	Род <i>Populus</i>	Род <i>Quercus</i>	Род <i>Tilia</i>	Род <i>Alnus</i>	Вид <i>Fagus sylvatica</i>
Свободный член уравнения, скорректированный на логарифмическое преобразование данных	a_0	6,1786	6,2408	6,4355	5,8878	5,7733	6,1747
Натуральный логарифм возраста дерева	$a_1(\ln A)$	—	—	-0,0394	0,0625	0,06	0,058
Фиктивные переменные	$a_2 X_1$	0,0763	-0,2161	0,036	-0,0339	0,218	-0,0531
	$a_3 X_2$	0,1647	-0,1947	0,0352	-0,1288	0,1062	-0,0879
	$a_4 X_3$	0,0394	-0,2491	0,0342	0,1278	0,102	0,0154
	$a_5 X_4$	0,0308	-0,4501	-0,0116	-0,0826	0,1109	—
	$a_6 X_5$	0,0357	-0,1841	-0,0008	-0,0310	—	—
	$a_7 X_6$	0,0511	-0,1776	0,2123	-0,1435	—	—
	$a_8 X_7$	0,0083	-0,1790	-0,0469	-0,2738	—	—
	$a_9 X_8$	0,2209	-0,3726	—	—	—	—
	$a_{10} X_9$	0,0682	—	—	—	—	—
	$a_{11} X_{10}$	0,106	—	—	—	—	—
	$a_{12} X_{11}$	0,1151	—	—	—	—	—
Коэффициент детерминации, скорректированный на число переменных	adjR ²	0,202	0,53	0,24	0,202	0,323	0,176
Стандартная ошибка модели	SE	0,064	0,05	0,07	0,118	0,061	0,064

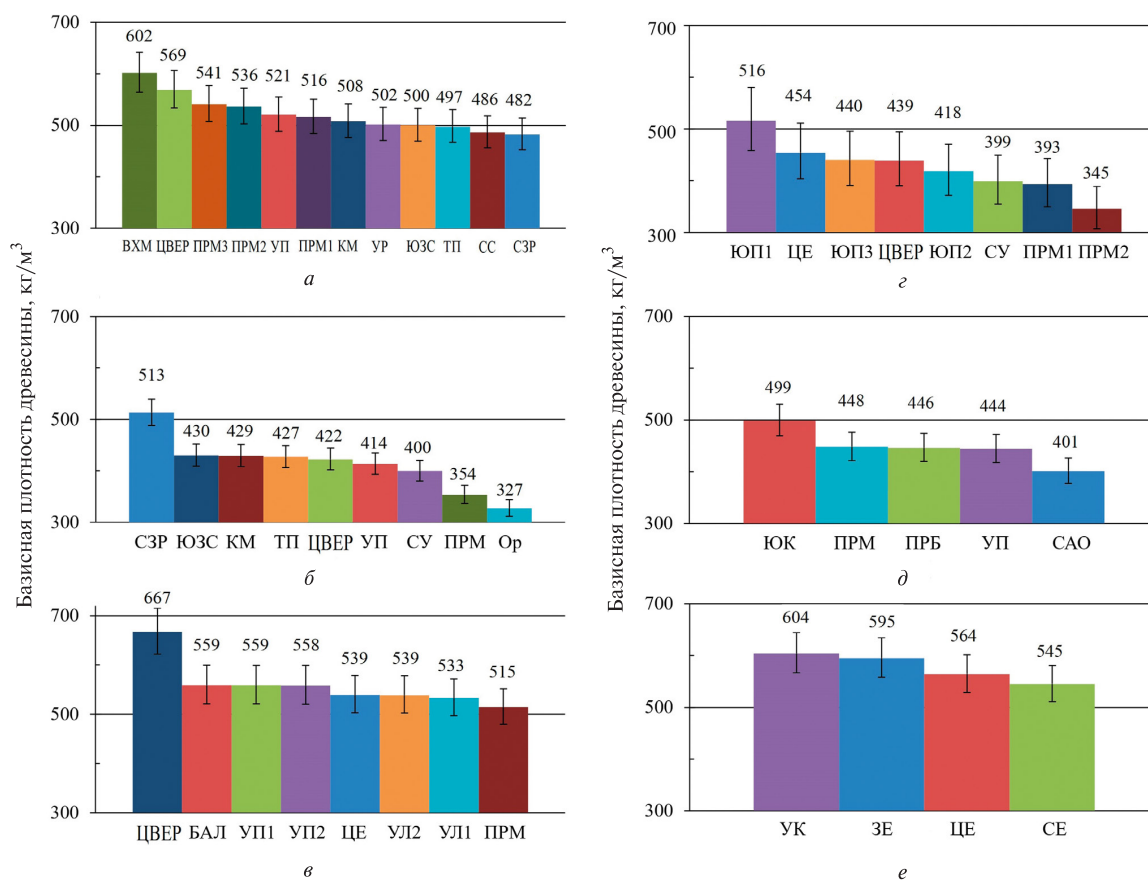


Рис. 1. Ранжирование принятых в табл. 1 кластеров по значению БП стволовой древесины в коре в убывающей последовательности для четырех родов и одного вида (кодировку кластеров см. в табл. 1): а — *Betula* L.; б — *Populus* L.; в — *Quercus* L.; г — *Tilia* L.; д — *Alnus* Gaertn.; е — *Fagus sylvatica* L.

Fig. 1. Ranking of clusters based on the value of trunk timber basic density in bark in descending order for four genera and one species (see Table 1 for cluster coding): а — *Betula* L.; б — *Populus* L.; в — *Quercus* L.; г — *Tilia* L.; д — *Alnus* Gaertn.; е — *Fagus sylvatica* L.

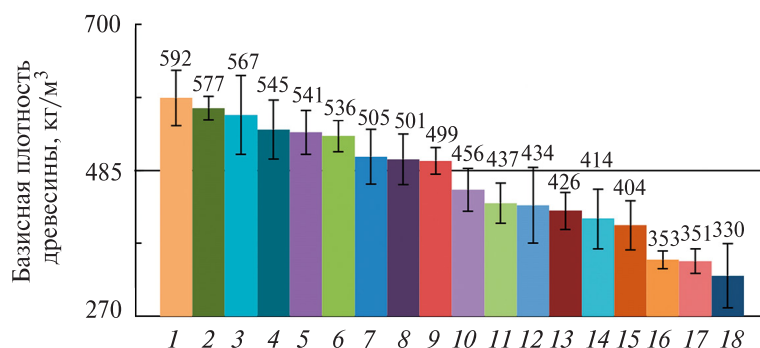


Рис. 2. Диаграмма распределения 18 лесообразующих видов Евразии по значению БП стволовой древесины в коре: 1 — *Fagus sylvatica* L.; 2 — *Quercus longipes* Stev.; 3 — *Betula platyphylla* Suk.; 4 — *Quercus robur* L.; 5 — *Betula dahurica* Pall.; 6 — *Betula costata* Trautv.; 7 — *Betula pendula* Roth.; 8 — *Quercus mongolica* F. ex L.; 9 — *Betula pubescens* Ehrh.; 10 — *Alnus hirsute* (Spach) T. ex R.; 11 — *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.; 12 — *Tilia cordata* Mill.; 13 — *Populus tremula* L.; 14 — *Alnus incana* (L.) Moench.; 15 — *Tilia amurensis* Rupr.; 16 — *Populus davidiana* Dode; 17 — *Tilia mandshurica* Rupr. & Maxim.; 18 — *Populus nigra* L.

Fig. 2. Diagram of distribution of 18 forest-forming species of Eurasia by the value of trunk timber basic density in bark: 1 — *Fagus sylvatica* L.; 2 — *Quercus longipes* Stev.; 3 — *Betula platyphylla* Suk.; 4 — *Quercus robur* L.; 5 — *Betula dahurica* Pall.; 6 — *Betula costata* Trautv.; 7 — *Betula pendula* Roth.; 8 — *Quercus mongolica* F. ex L.; 9 — *Betula pubescens* Ehrh.; 10 — *Alnus hirsute* (Spach) T. ex R.; 11 — *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.; 12 — *Tilia cordata* Mill.; 13 — *Populus tremula* L.; 14 — *Alnus incana* (L.) Moench.; 15 — *Tilia amurensis* Rupr.; 16 — *Populus davidiana* Dode; 17 — *Tilia mandshurica* Rupr. & Maxim.; 18 — *Populus nigra* L.

У рода *Quercus* максимальное значение БП древесины приходится на дуб черешчатый с ареалом на Восточно-Европейской (Русской) равнине (667 кг/м^3) и минимальное — на дуб монгольский в Приморье (515 кг/м^3). При этом на основной части ряда распределения изменение БП древесины небольшое, а именно: от 559 кг/м^3 у дуба длинноножкового на Балканах до 533 кг/м^3 у дуба черешчатого в украинской лесостепи.

У рода *Tilia* максимальное значение БП древесины приходится на липу мелколистную в южных районах Предуралья (516 кг/м^3) и минимальное — на липу маньчжурскую в Приморье (345 кг/м^3), у рода *Alnus* — на ольху серую соответственно в Южной Карелии (499 кг/м^3) и на севере Архангельской области (401 кг/м^3), у бука лесного диапазон БП древесины в ряду распределения по четырем кластерам сравнительно небольшой: от 604 кг/м^3 в Украинских Карпатах до 545 кг/м^3 в Северной Европе.

Территориально выделенные кластеры заполнены фактическими данными БП древесины по видам неравномерно и крайне недостаточно, а представленные ранжирования характеризуются множеством «белых пятен». Для заполнения этих «белых пятен» при оценках фитомассы стволовой древесины в коре на соответствующих пробных площадях приводится ранжирование средних видоспецифичных значений БП древесины (рис. 2).

Это второе ранжирование выполнено на уровне видов, когда данные всех регионов и происхождений объединены в пределах вида. Результаты ранжирования (см. рис. 2) показывают, что наибольшим значением БП древесины характеризуется бук лесной (592 кг/м^3) и наименьшим — тополь черный (330 кг/м^3).

Выводы

Разработаны регрессионные модели смешанного типа для БП запаса стволовой древесины в коре, специфичные по кластерам, представляющим регионы в пределах рода, виды и происхождения в пределах региона. Структура модели смешанного типа позволяет выполнить ранжирование кластеров по БП древесины стволов при условии их равенства по возрасту деревьев (за исключением родов *Betula* и *Populus*, у которых возраст дерева в моделях статистически незначим).

Выполнены два ранжирования по значению БП запаса стволовой древесины в коре, а именно ранжирование кластеров в пределах рода (для бука лесного — в пределах вида) и видоспецифичное ранжирование, согласно которому максимальным значением характеризуется бук лесной и минимальным — тополь черный.

Полученные модели и ранжирования видов по значению БП запаса стволовой древесины в коре

могут быть использованы при расчетах углеродного пула в лиственных древостоях по данным инвентаризации лесов.

Список литературы

- [1] Augustine S.P., Bailey-Marren I., Charton K.T., Kiel N.G., Peyton M.S. Improper data practices erode the quality of global ecological databases and impede the progress of ecological research // *Global Change Biology*, 2024, v. 30, article e17116. <https://doi.org/10.1111/gcb.17116>
- [2] Gallagher R.V., Falster D.S., Maitner B.S., Salguero-Gómez R., Vandvik V., Pearse W.D., Schneider F.D., Kattge J., Poelen J.H., Madin J.S., Ankenbrand M.J., Penone C., Feng X., Adams V.M., Alroy J., Andrew S.C., Balk M.A., Bland L.M., Boyle B.L., Enquist B.J. Open science principles for accelerating trait-based science across the tree of life // *Nature Ecology & Evolution*, 2020, v. 4, pp. 294–303. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-1109-6>
- [3] Wüest R.O., Zimmermann N.E., Zurell D., Alexander J.M., Fritz S.A., Hof C., Krefth H., Normand S., Cabral J.S., Szekely E., Thuiller W., Wikelski M., Karger D.N. Macroecology in the age of big data — Where to go from here? // *J. of Biogeography*, 2020, v. 47, no. 1, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1111/jbi.13633>
- [4] Kattge J., Bönisch G., Díaz S., Lavorel S., Prentice I.C., Leadley P., Tautenhahn S., Werner G.D.A., Aakala T., Abedi N., Acosta A.T.R., Adamidis G.C., Adamson K., Aiba M., Albert C.H., Alcantara J.M., Carolina Alcazar C., Aleixo I., Ali H., Wirth C. TRY plant trait database – Enhanced coverage and open access // *Global Change Biology*, 2020, v. 26, no. 1, pp. 119–188. DOI: 10.1111/gcb.14904
- [5] Petráš R., Mecko J., Krupová D. Aboveground biomass basic density of hardwoods tree species // *Wood Research*, 2020, v. 65, no. 6, pp. 1001–1012. DOI:10.37763/wr.1336-4561/65.6.10011012
- [6] Ashwath M.N., Sathish B.N., Deepthi Dechamma N.L., Devagiri G.M., Hegde R.K., Hareesh T.S. Geographic and within tree variation for wood properties in *Acrocarpus fraxinifolius* Wight and Arn. populations // *J. of Scientific & Industrial Research*, 2021, v. 80, pp. 1049–1055. DOI: 10.56042/jsir.v80i12.44915
- [7] McLean P. Wood properties and uses of Scots pine in Britain. Forestry Commission Research Report. Forestry Commission, Edinburgh, 2019, 36 p.
- [8] Ребко С.В., Поплавская Л.Ф., Тулик П.В., Ермак И.Т., Боровик П.В., Мельник П.Г. Оценка динамики сохранности и радиального прироста климатических экотипов сосны обыкновенной в географических лесных культурах // *Актуальные проблемы развития лесного комплекса*. Вологда, 2023. С. 453–456.
- [9] FAO, ITTO and United Nations. Forest product conversion factors. Rome, 2020, 70 p. <https://doi.org/10.4060/ca7952en>
- [10] Zhou L., Chen Z., Lundqvist S.-O., Olsson L., Grahn T., Karlsson B., Wu H.X., García-Gil M.R. Genetic analysis of wood quality traits in Norway spruce open-pollinated progenies and their parent plus trees at clonal archives and the evaluation of phenotypic selection of plus trees // *Canadian J. of Forest Research*, 2019, v. 49, no. 7, pp. 810–818. DOI:10.1139/cjfr-2018-0117
- [11] Calleja-Rodríguez A., Pan J., Funda T., Chen Z.-Q., Baisson J., Isik F., Abrahamsson S., Wu H.X. Genomic prediction accuracies and abilities for growth and wood quality traits of Scots pine, using genotyping-by-sequencing (GBS) data // *BioRxiv*, 2019. <http://dx.doi.org/10.1101/607648>

- [12] Hayatgheibi H., Fries A., Kroon J., Wu H.X. Genetic analysis of fiber dimension traits and combined selection for simultaneous improvement of growth and stiffness in lodgepole pine (*Pinus contorta*) // Canadian J. of Forest Research, 2019, v. 49, no. 5, pp. 500–509. DOI:10.1139/CJFR-2018-0445
- [13] Suontama M., Klápště J., Telfer E., Graham N., Stovold T., Low C., McKinley R., Dungey H. Efficiency of genomic prediction across two *Eucalyptus nitens* seed orchards with different selection histories // Heredity, 2019, v. 122, pp. 370–379. <https://doi.org/10.1038/s41437-018-0119-5>
- [14] Fedorkov A., Andersson Gull B., Persson T., Mullin T.J. Longitudinal differences in scots pine shoot elongation // Silva Fennica, 2018, t. 52, no. 5, p. 10040.
- [15] Arunkumar A.N., Chauhan S.S. Non-destructive selection of genotypes with better wood properties from morphologically superior genotypes of *Eucalyptus pellita* // Current Science, 2020, v. 118, no. 12, pp. 1953–1958.
- [16] Ukrainetz N.K., Mansfield S.D. Assessing the sensitivities of genomic selection for growth and wood quality traits in lodgepole pine using Bayesian models // Tree Genetics and Genomes, 2020, v. 16, no. 1, pp. 1–19. <https://doi.org/10.1007/s11295-019-1404-z>
- [17] Poorter L., Rozendaal D.M.A., Bongers F., Westoby M. Wet and dry tropical forests show opposite successional pathways in wood density but converge over time // Nature Ecology and Evolution, 2019, v. 3, pp. 928–934. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-0882-6>
- [18] Giroud G., Schneider R., Fournier R.A., Luther J.E., Martin-Ducup O. Modeling black spruce wood fiber attributes with terrestrial laser scanning // Canadian J. of Forest Research, 2019, v. 49, no. 6, pp. 661–669. DOI:10.1139/CJFR-2018-0342
- [19] Giagli K., Vavřík H., Fajstavr M., Černý J., Novosadová K., Martiník A. Stand factors affecting the wood density of naturally regenerated young silver birch growing at the lower altitude of the Czech Republic region // Wood Research, 2019, v. 64, no. 6, pp. 1011–1022.
- [20] Chowdhury Q., Sarker S.K., Ali B., Imran I.H., Datta A., Leban J.-M. Accounting intra-tree radial wood density variation provides more accurate above ground mangrove biomass estimation in the Sundarbans // Research Square, 2024, pp. 1–26. DOI: 10.21203/rs.3.rs-3505676/v1
- [21] Liepiņš J., Jaunslaviete I., Liepiņš K., Jansone L., Matisons R., Lazdiņš A., Jansons Ā. Effect of stem rot on wood basic density, carbon, and nitrogen content of living deciduous trees in hemiboreal forests // Silva Fennica, 2023, v. 57, no. 3, article 23040. <https://doi.org/10.14214/sf.23040>
- [22] Schimleck L., Dahlen J., Apiolaza L.A., Downes G., Emms G., Evans R., Moore J., Pâques L., Van den Bulcke J., Wang X. Non-destructive evaluation techniques and what they tell us about wood property variation // Forests, 2019, v. 10, article 728. DOI:10.3390/f10090728
- [23] Усольцев В.А., Цепордей И.С. Квалиметрия фитомассы лесных деревьев. Методы неразрушающего контроля, база данных и ее приложения. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2023. 186 с.
- [24] Medeiros D.T., Melo R.R., Cademartori P.H.G., Batista F.G., Mascarenhas A.R.P., Scatolino M.V., Hein P.R.G. Prediction of the basic density of tropical woods by near-infrared spectroscopy // CERNE, 2023, v. 29, article 103262. DOI:10.1590/01047760202329013262
- [25] Giroud G., Defo M., Begin J. Determination of radial profiles of wood properties using a near infrared scanning system // J. of Near Infrared Spectroscopy, 2021, v. 29, no. 1, pp. 24–32. <https://doi.org/10.1364/JNIRS.29.000024>
- [26] Rocha M.F.V., Veiga T.R.L.A., Soares B.C.D., de Araújo A.C.C., Carvalho A.M.M., Hein P.R.G. Do the growing conditions of trees influence the wood properties? // Floresta e Ambiente, 2019, v. 26, no. 3, article e20180353. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.035318>
- [27] Kerfriden B., Bontemps J.-D., Leban J.-M. Variations in temperate forest stem biomass ratio along three environmental gradients are dominated by interspecific differences in wood density // Plant Ecology, 2021, v. 222, pp. 289–303. <https://doi.org/10.1007/s11258-020-01106-0>
- [28] Santos M.E.C., Melo R.R., Correia D., Sousa J.A., Santos A.M., Silva A.K.V., Paula E.A.O., Alves A.R., Scatolino M.V., Rusch F., Mascarenhas A.R.P., Pimenta A.S., Stangerlin D.M. Variation in the basic density of woods produced in the Brazilian semi-arid region subjected to different irrigation regimes // Forests, 2023, v. 14, article 2168. <https://doi.org/10.3390/f14112168>
- [29] Teegalapalli K., Pandey C.K., Osuri A.M., Ratnam J., Sankaran M. Understanding the variation in wood densities of trees and its implications for carbon assessments // BioRxiv, 2019, article 523480. <https://doi.org/10.1101/523480>
- [30] Усольцев В.А., Цепордей И.С., Шубаири С.О.Р., Дар Дж.А., Часовских В.П. Аддитивные аллометрические модели фитомассы деревьев и древостоев двухвойных сосен как основа региональных таксационных нормативов для Евразии // Эко-потенциал, 2018. № 1 (21). С. 27–47.
- [31] Цепордей И.С. Биологическая продуктивность лесообразующих видов в климатическом контексте Евразии / под ред. В.А. Усольцева. Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2023. 467 с. <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12450>
- [32] Syofyan L., Maideliza T., Syamsuardi, Mansyurdin. Variation of wood density and anatomical characters from altitude differences: Case study of selected *Fabaceae* trees in West Sumatra secondary forest, Indonesia // Int. Conf. on Basic Sciences and Its Applications, KnE Engineering, 2019, pp. 190–203. DOI:10.18502/keg.v1i2.4444
- [33] Усольцев В.А., Цепордей И.С. Квалиметрия фитомассы лесных деревьев. Плотность и содержание сухого вещества. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ; Ботанический сад УрО РАН, 2020. https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/10022/1/Usolcev_20.pdf
- [34] Fabisiak E., Fabisiak B. Relationship of tracheid length, annual ring width, and wood density in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). Trees from different social classes of tree position in the stand // BioResources, 2021, v. 16, no. 4, pp. 7492–7508.
- [35] Vicentin P.G., Cambuim J., Florsheim S.M.B., de Moraes M.L.T., Longui E.L. Longitudinal variation of wood basic density and anatomy of *Curatella americana* L. // Scientific Electronic Archives, 2021, v. 14, no. 10, pp. 20–25. <http://dx.doi.org/10.36560/141020211396>
- [36] Zhang S.Y., Ren H., Jiang Z. Wood density and wood shrinkage in relation to initial spacing and tree growth in black spruce (*Picea mariana*) // J. of Wood Science, 2021, v. 67, article 30. <https://doi.org/10.1186/s10086-021-01965-9>
- [37] Dobrowolska E., Wroniszewska P., Jankowska A. Density distribution in wood of European birch (*Betula pendula* Roth) // Forests, 2020, v. 11, article 445. DOI:10.3390/f11040445
- [38] Erdene-Ochir T., Ishiguri F., Nezu I., Tumenjargal B., Baasan B., Chultem G., Ohshima J., Yokota S. Modeling of radial variations of wood properties in naturally regenerated trees of *Betula platyphylla* grown in Selenge, Mongolia // J. of Wood Science, 2021, v. 67, article 61. <https://doi.org/10.1186/s10086-021-01993-5>

- [39] Wentzel M., Pesenti H., Droppelmann F., Rollerli A. Thinning wood properties of *Nothofagus alpina* under three different silvicultural conditions // *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 2024, v. 26, article 7. <https://doi.org/10.22320/s0718221x/2024.07>
- [40] Cahuana L.A.P., Piña E.A.G., Tuesta G.P., Tomazello-Filho M. Radial variation of wood density and fiber morphology of two commercial species in a tropical humid forest in southeastern Peru // *CERNE*, 2023, v. 29, article e-103143. DOI: 10.1590/01047760202329013143
- [41] Liepinš K., Liepinš J., Ivanovs J., Bardule A., Jansone L., Jansons A. Variation in the basic density of the tree components of gray alder and common alder // *Forests*, 2023, v. 14, article 135. <https://doi.org/10.3390/f14010135>
- [42] Riki J.T.B., Adeyemo S.M., Majekobaje A.R., Oyelere A.T., Oluwadare A.O. Density variation in axial and radial positions of Caribbean pine (*Pinus Caribaea* Morelet) grown in Afaka, Nigeria // *J. of Agriculture and Environment*, 2019, v. 15, no. 2, pp. 163–171.
- [43] Demol M., Calders K., Krishna Moorthy S.M., van den Bulcke J., Verbeeck H., Gielen B. Consequences of vertical basic wood density variation on the estimation of aboveground biomass with terrestrial laser scanning // *Trees – Structure and Function*, 2021, v. 35, pp. 671–684. <https://doi.org/10.1007/s00468-020-02067-7>
- [44] Sseremba O.E., Mugabi P., Banana A.Y., Wessels B.C., Plessis M. Variation of basic density, calorific value and volumetric shrinkage within tree height and tree age of Ugandan grown *Eucalyptus grandis* wood // *J. of Forestry Research*, 2021, v. 32, pp. 503–512. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01141-7>
- [45] Ribeiro M.D.S.B., Rodrigues S.A., Ballarin A.W. Multivariate association of wood basic density with site and plantation variables in *Eucalyptus* spp. // *Canadian J. of Forest Research*, 2020, v. 50, no. 2, pp. 193–202. <http://hdl.handle.net/11449/201527>
- [46] Repola J., Lindblad J., Heikkinen J. Pulpwood green density prediction models and sampling-based calibration // *Silva Fennica*, 2021, v. 55, no. 4, article 10539. <https://doi.org/10.14214/sf.10539>
- [47] Baez S., Fadrique B., Feeley K., Homeier J. Changes in tree functional composition across topographic gradients and through time in a tropical montane forest // *PLoS ONE*, 2022, v. 17, no. 4, article e0263508. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0263508>
- [48] Que Q., Ouyang K., Li C., Li B., Song H., Li P., Pian R., Li H., Chen X., Peng C. Geographic variation in growth and wood traits of *Neolamarckia cadamba* in China // *Forestry Research*, 2022, v. 2, article 12. <https://doi.org/10.48130/FR-2022-0012>
- [49] Bouslimi B., Koubaa A., Bergeron Y. Regional, site, and tree variations of wood density and growth in *Thuja occidentalis* L. in the Quebec forest // *Forests*, 2022, v. 13, article 1984. <https://doi.org/10.3390/f13121984>
- [50] Shchekalev R.V., Danilov D.A., Zaytsev D.A., Korchagov S.A., Melekov V.I. Variation of physical and mechanical properties of *Pinus sylvestris* L. wood in the boreal zone of the European Northeast // *South-East European Forestry*, 2023, v. 14, no. 2, pp. 197–213. <https://doi.org/10.15177/seeefor.23-18>
- [51] Vaughan D., Auty D., Kolb T.E., Meador A.J.S., Mackes K.H., Dahlen J., Moser W.K. Climate has a larger effect than stand basal area on wood density in *Pinus ponderosa* var. *scopulorum* in the southwestern USA // *Annals of Forest Science*, 2019, v. 76, no. 3, article 85. DOI: 10.1007/s13595-019-0869-0
- [52] Wylie R.R.M., Woods M.E., Dech J.P. Estimating stand age from airborne laser scanning data to improve models of black spruce wood density in the boreal forest of Ontario // *Remote Sensing*, 2019, v. 11, article 2022. DOI: 10.3390/rs11172022
- [53] Šilinskas B., Varnagirytė-Kabašinskiene I., Aleinikovas M., Beniušiene L., Aleinikoviene J., Škema M. Scots pine and Norway spruce wood properties at sites with different stand densities // *Forests*, 2020, v. 11, no. 5, article 587. DOI: 10.3390/F11050587
- [54] Balasso M., Hunt M., Jacobs A., O'Reilly-Wapstra J. Characterisation of wood quality of *Eucalyptus nitens* plantations and predictive models of density and stiffness with site and tree characteristics // *Forest Ecology and Management*, 2021, v. 491, article 118992. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118992>
- [55] Tonouewa J.F.M.F., Biaou S.S.H., Assede E.S.P., Langbour P., Balagueman O.R. Influence of growth parameters on wood density of *Acacia auriculiformis* // *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 2022, v. 24, article 19. <https://doi.org/10.4067/s0718-221x2022000100419>
- [56] Yang H., Stereńczak K., Karaszewski Z., Carvalhais N. Similar importance of inter-tree and intra-tree variations in wood density observations in Central Europe // *EGUsphere*, 2024. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-2691>
- [57] Marden M., Lambie S., Burrows L. Species-specific basic stem-wood densities for twelve indigenous forest and shrubland species of known age, New Zealand // *New Zealand J. of Forestry Science*, 2021, v. 51, article 1. <https://doi.org/10.33494/nzjfs12021x121x>
- [58] Magalhães T.M. Effects of site and tree size on wood density and bark properties of Lebombo ironwood (*Androstachys johnsonii* Prain) // *New Zealand J. of Forestry Science*, 2021, v. 51, article 3. <https://doi.org/10.33494/nzjfs12021x32x>
- [59] Kowaluk G., Szymanowski K., Kozłowski P., Kukula W., Sala C., Robles E., Czarniak P. Functional assessment of particleboards made of apple and plum orchard pruning // *Waste and Biomass Valorization*, 2020, v. 11, pp. 2877–2886. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-00568-8>
- [60] Yoshioka T. Current situation and future outlook of forest biomass production and its utilization in Japan // *Biotechnological Applications of Biomass* / Eds. T.P. Basso, T.O. Basso, L.C. Basso. London: IntechOpen, 2021, pp. 129–147. DOI: 10.5772/intechopen.93433
- [61] Усольцев В.А. Фитомасса модельных деревьев для дистанционной и наземной таксации лесов Евразии. Екатеринбург: Изд-во Ботанического сада УрО РАН; УГЛ-ТУ, 2023. <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12451>
- [62] Usoltsev V.A. Stem taper, density and dry matter content in biomass of trees growing in Central Eurasia. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, Botanical Garden of Ural Branch of RAS, 2020. <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/9649>
- [63] Карабан А.А., Усольцев В.А., Третьяков С.В., Коптев С.В., Парамонов А.А., Цветков И.В., Давыдов А.В., Цепордей И.С. Биомасса деревьев ольхи серой и ее аллометрические модели в условиях Архангельской области // *Леса России и хозяйство в них*, 2023, № 2. С. 42–50. DOI: 10.51318/FRET.2023.36.20.005.
- [64] Usoltsev V.A., Shobairi O., Tsepordey I.S., Zukow W. Allometric models to predicate single-tree biomass in the Eurasian *Larix* spp. forest // *Ecological Questions*, 2021, v. 32, no. 1, pp. 29–36. <http://dx.doi.org/10.12775/EQ.2021.003>

Сведения об авторах

Усольцев Владимир Андреевич [✉] — д-р с.-х. наук, профессор, гл. науч. сотр., ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук», профессор кафедры лесной таксации и лесоустройства, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», Usoltsev50@mail.ru

Плюха Николай Иванович — аспирант кафедры лесной таксации и лесоустройства, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», nikcskript@mail.ru

Цепордей Иван Степанович — канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр., ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук», ivan.tsepordey@yandex.ru

Поступила в редакцию 07.03.2024.

Одобрено после рецензирования 22.08.2024.

Принята к публикации 06.09.2024.

REGIONAL FEATURES OF HARDWOODS TRUNK TIMBER STOCK BASIC DENSITY IN BARK WITHIN EURASIA

V.A. Usoltsev^{1,2✉}, N.I. Plyukha¹, I.S. Tsepordey²

¹Ural State Forestry Engineering University, 37, Siberian tract, 620100, Yekaterinburg, Russia

²Botanical Garden of the Ural Branch of the RAS, 202a, 8 Marta st., 620144, Yekaterinburg, Russia

Usoltsev50@mail.ru

This study analyzes the regional characteristics of the trunk timber stock basic density in the bark of deciduous tree species growing in Eurasia. Being based on the data obtained from 2741 trees from six deciduous tree genera (species) growing in Eurasia, regression models of a mixed type have been developed for the trunk timber stock basic density, specific for clusters representing regions within the genus, species and origin of stands within the region. The structure of a mixed type model makes it possible to rank clusters according to the trunk timber stock basic bark density, provided that they are equal in age of trees (with the exception of the genera *Betula* and *Populus*, in which the age of the tree in the models is statistically insignificant). Two rankings were made according to the value of the trunk timber stock basic density in the bark, namely, the ranking of clusters within the genus (for European Beech — within the species) and species — specific ranking, according to which the maximum value is characterized by forest beech and the minimum is Black Poplar. The obtained models and the ranking of species by the value of the trunk timber stock basic density in the bark can be used to calculate the carbon pool in deciduous stands according to the forest inventory data.

Keywords: Forest-forming species of Eurasia, trunk timber stock basic density in the bark, regression models of mixed type, species ranking

Suggested citation: Usoltsev V.A., Plyukha N.I., Tsepordey I.S. *Regional'nye osobennosti bazisnoy plotnosti zapasa stvolovoy drevesiny v kore u listvennykh drevesnykh vidov Evrazii* [Regional features of hardwoods trunk timber stock basic density in bark within Eurasia]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 5, pp. 5–18. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-5-18

References

- [1] Augustine S.P., Bailey-Marren I., Charton K.T., Kiel N.G., Peyton M.S. Improper data practices erode the quality of global ecological databases and impede the progress of ecological research. *Global Change Biology*, 2024, v. 30, article e17116. <https://doi.org/10.1111/gcb.17116>
- [2] Gallagher R.V., Falster D.S., Maitner B.S., Salguero-Gómez R., Vandvik V., Pearse W.D., Schneider F.D., Kattge J., Poelen J.H., Madin J.S., Ankenbrand M.J., Penone C., Feng X., Adams V.M., Alroy J., Andrew S.C., Balk M.A., Bland L.M., Boyle B.L., Enquist B.J. Open science principles for accelerating trait-based science across the tree of life. *Nature Ecology & Evolution*, 2020, v. 4, pp. 294–303. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-1109-6>
- [3] Wüest R.O., Zimmermann N.E., Zurell D., Alexander J.M., Fritz S.A., Hof C., Kreft H., Normand S., Cabral J.S., Szekely E., Thuiller W., Wikelski M., Karger D.N. Macroecology in the age of big data — Where to go from here?. *J. of Biogeography*, 2020, v. 47, no. 1, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1111/jbi.13633>
- [4] Kattge J., Bönnisch G., Díaz S., Lavorel S., Prentice I.C., Leadley P., Tautenhahn S., Werner G.D.A., Aakala T., Abedi N., Acosta A.T.R., Adamidis G.C., Adamson K., Aiba M., Albert C.H., Alcantara J.M., Carolina Alcazar C., Aleixo I., Ali H., Wirth C. TRY plant trait database – Enhanced coverage and open access. *Global Change Biology*, 2020, v. 26, no. 1, pp. 119–188. DOI: 10.1111/gcb.14904
- [5] Petráš R., Mecko J., Krupová D. Aboveground biomass basic density of hardwoods tree species. *Wood Research*, 2020, v. 65, no. 6, pp. 1001–1012. DOI:10.37763/wr.1336-4561/65.6.10011012
- [6] Ashwath M.N., Sathish B.N., Deepthi Dechamma N.L., Devagiri G.M., Hegde R.K., Hareesh T.S. Geographic and within tree variation for wood properties in *Acrocarpus fraxinifolius* Wight and Arn. populations. *J. of Scientific & Industrial Research*, 2021, v. 80, pp. 1049–1055. DOI: 10.56042/jsir.v80i12.44915

- [7] McLean P. Wood properties and uses of Scots pine in Britain. Forestry Commission Research Report. Forestry Commission, Edinburgh, 2019, 36 p.
- [8] Rebko S.V., Poplavskaya L.F., Tupik P.V., Ermak I.T., Borovik P.V., Mel'nik P.G. *Otsenka dinamiki sokhrannosti i radial'nogo prirosta klimaticheskikh ekotipov sosny obyknovennoy v geograficheskikh lesnykh kul'turakh* [Assessment of the dynamics of preservation and radial growth of climatic ecotypes of Scots pine in geographical forest cultures]. Aktual'nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa [Current problems of development of the forest complex]. Vologda, 2023, pp. 453–456.
- [9] FAO, ITTO and United Nations. Forest product conversion factors. Rome, 2020, 70 p. <https://doi.org/10.4060/ca7952en>
- [10] Zhou L., Chen Z., Lundqvist S.-O., Olsson L., Grahn T., Karlsson B., Wu H.X., Garcia-Gil M.R. Genetic analysis of wood quality traits in Norway spruce open-pollinated progenies and their parent plus trees at clonal archives and the evaluation of phenotypic selection of plus trees. Canadian J. of Forest Research, 2019, v. 49, no. 7, pp. 810–818. DOI:10.1139/cjfr-2018-0117
- [11] Calleja-Rodriguez A., Pan J., Funda T., Chen Z.-Q., Baison J., Isik F., Abrahamsson S., Wu H.X. Genomic prediction accuracies and abilities for growth and wood quality traits of Scots pine, using genotyping-by-sequencing (GBS) data. BioRxiv, 2019. <http://dx.doi.org/10.1101/607648>
- [12] Hayatgheibi H., Fries A., Kroon J., Wu H.X. Genetic analysis of fiber dimension traits and combined selection for simultaneous improvement of growth and stiffness in lodgepole pine (*Pinus contorta*). Canadian J. of Forest Research, 2019, v. 49, no. 5, pp. 500–509. DOI:10.1139/CJFR-2018-0445
- [13] Suontama M., Klápště J., Telfer E., Graham N., Stovold T., Low C., McKinley R., Dungey H. Efficiency of genomic prediction across two *Eucalyptus nitens* seed orchards with different selection histories. Heredity, 2019, v. 122, pp. 370–379. <https://doi.org/10.1038/s41437-018-0119-5>
- [14] Fedorkov A., Andersson Gull B., Persson T., Mullin T.J. Longitudinal differences in scots pine shoot elongation. Silva Fennica, 2018, t. 52, no. 5, p. 10040.
- [15] Arunkumar A.N., Chauhan S.S. Non-destructive selection of genotypes with better wood properties from morphologically superior genotypes of *Eucalyptus pellita*. Current Science, 2020, v. 118, no. 12, pp. 1953–1958.
- [16] Ukrainetz N.K., Mansfield S.D. Assessing the sensitivities of genomic selection for growth and wood quality traits in lodgepole pine using Bayesian models. Tree Genetics and Genomes, 2020, v. 16, no. 1, pp. 1–19. <https://doi.org/10.1007/s11295-019-1404-z>
- [17] Poorter L., Rozendaal D.M.A., Bongers F., Westoby M. Wet and dry tropical forests show opposite successional pathways in wood density but converge over time. Nature Ecology and Evolution, 2019, v. 3, pp. 928–934. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-0882-6>
- [18] Giroud G., Schneider R., Fournier R.A., Luther J.E., Martin-Ducup O. Modeling black spruce wood fiber attributes with terrestrial laser scanning. Canadian J. of Forest Research, 2019, v. 49, no. 6, pp. 661–669. DOI:10.1139/CJFR-2018-0342
- [19] Giagli K., Vavřík H., Fajstavr M., Černý J., Novosadová K., Martiník A. Stand factors affecting the wood density of naturally regenerated young silver birch growing at the lower altitude of the Czech Republic region. Wood Research, 2019, v. 64, no. 6, pp. 1011–1022.
- [20] Chowdhury Q., Sarker S.K., Ali B., Imran I.H., Datta A., Leban J.-M. Accounting intra-tree radial wood density variation provides more accurate above ground mangrove biomass estimation in the Sundarbans. Research Square, 2024, pp. 1–26. DOI: 10.21203/rs.3.rs-3505676/v1
- [21] Liepiņš J., Jaunslaviete I., Liepiņš K., Jansone L., Matisons R., Lazdiņš A., Jansons Ā. Effect of stem rot on wood basic density, carbon, and nitrogen content of living deciduous trees in hemiboreal forests. Silva Fennica, 2023, v. 57, no. 3, article 23040. <https://doi.org/10.14214/sf.23040>
- [22] Schimleck L., Dahlen J., Apiolaza L.A., Downes G., Emms G., Evans R., Moore J., Pâques L., Van den Bulcke J., Wang X. Non-destructive evaluation techniques and what they tell us about wood property variation. Forests, 2019, v. 10, article 728. DOI:10.3390/f10090728
- [23] Usoltsev V.A., Tsepordey I.S. *Kvalimetriya fitomassy lesnykh dereviev: metody nerazrushayushchego kontrolya, baza dannykh i ee prilozheniya* [Qualimetry of phytomass of forest trees. Non-destructive testing methods, database and its applications]. Yekaterinburg: UGLTU, 2023, 186 p.
- [24] Medeiros D.T., Melo R.R., Cademartori P.H.G., Batista F.G., Mascarenhas A.R.P., Scatolino M.V., Hein P.R.G. Prediction of the basic density of tropical woods by near-infrared spectroscopy. CERNE, 2023, v. 29, article 103262. DOI:10.1590/01047760202329013262
- [25] Giroud G., Defo M., Begin J. Determination of radial profiles of wood properties using a near infrared scanning system. J. of Near Infrared Spectroscopy, 2021, v. 29, no. 1, pp. 24–32. <https://doi.org/10.1364/JNIRS.29.000024>
- [26] Rocha M.F.V., Veiga T.R.L.A., Soares B.C.D., de Araújo A.C.C., Carvalho A.M.M., Hein P.R.G. Do the growing conditions of trees influence the wood properties?. Floresta e Ambiente, 2019, v. 26, no. 3, article e20180353. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.035318>
- [27] Kerfriden B., Bontemps J.-D., Leban J.-M. Variations in temperate forest stem biomass ratio along three environmental gradients are dominated by interspecific differences in wood density. Plant Ecology, 2021, v. 222, pp. 289–303. <https://doi.org/10.1007/s11258-020-01106-0>
- [28] Santos M.E.C., Melo R.R., Correia D., Sousa J.A., Santos A.M., Silva A.K.V., Paula E.A.O., Alves A.R., Scatolino M.V., Rusch F., Mascarenhas A.R.P., Pimenta A.S., Stangerlin D.M. Variation in the basic density of woods produced in the Brazilian semiarid region subjected to different irrigation regimes. Forests, 2023, v. 14, article 2168. <https://doi.org/10.3390/f14112168>
- [29] Teegalapalli K., Pandey C.K., Osuri A.M., Ratnam J., Sankaran M. Understanding the variation in wood densities of trees and its implications for carbon assessments. BioRxiv, 2019, article 523480. <https://doi.org/10.1101/523480>
- [30] Usoltsev V.A., Tsepordey I.S., Shubairi S.O.R., Dar Dzh.A., Chasovskikh V.P. *Additivnye allometricheskie modeli fitomassy derev'ev i drevostoev dvukhvoynykh sosen kak osnova regional'nykh taksatsionnykh normativov dlya Evrazii* [Additive allometric models of phytomass of trees and stands of double-leaved pines as the basis of regional taxation standards for Eurasia]. Eco-potential, 2018, no. 1 (21), pp. 27–47.

- [31] Tsepordey I.S. *Biologicheskaya produktivnost' lesoobrazuyushchikh vidov v klimaticheskoy kontekste Evrazii* [Biological productivity of forest-forming species in the climatic context of Eurasia]. Ed. V.A. Usoltsev. Yekaterinburg: Izd-vo UMTs UPI, 2023, 467 p. <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12450>
- [32] Syofyan L., Maideliza T., Syamsuardi, Mansyurdin. Variation of wood density and anatomical characters from altitude differences: Case study of selected *Fabaceae* trees in West Sumatra secondary forest, Indonesia. International Conference on Basic Sciences and Its Applications, KnE Engineering, 2019, pp. 190–203. DOI:10.18502/keg.v1i2.4444
- [33] Usoltsev V.A., Tsepordey I.S. *Kvalimetriya fitomassy lesnykh dereviev: plotnost' i sodержanie sukhogo veshchestva* [Qualimetry of forest tree biomass: density and dry matter content]. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, Botanical Garden of Ural Branch of RAS, 2020. https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/10022/1/Usolcev_20.pdf
- [34] Fabisiak E., Fabisiak B. Relationship of tracheid length, annual ring width, and wood density in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). Trees from different social classes of tree position in the stand. BioResources, 2021, v. 16, no. 4, pp. 7492–7508.
- [35] Vicentin P.G., Cambuim J., Florsheim S.M.B., de Moraes M.L.T., Longui E.L. Longitudinal variation of wood basic density and anatomy of *Curatella americana* L. Scientific Electronic Archives, 2021, v. 14, no. 10, pp. 20–25. <http://dx.doi.org/10.36560/141020211396>
- [36] Zhang S.Y., Ren H., Jiang Z. Wood density and wood shrinkage in relation to initial spacing and tree growth in black spruce (*Picea mariana*). J. of Wood Science, 2021, v. 67, article 30. <https://doi.org/10.1186/s10086-021-01965-9>
- [37] Dobrowolska E., Wroniszewska P., Jankowska A. Density distribution in wood of European birch (*Betula pendula* Roth). Forests, 2020, v. 11, article 445. DOI:10.3390/f11040445
- [38] Erdene-Ochir T., Ishiguri F., Nezu I., Tumenjargal B., Baasan B., Chulthem G., Ohshima J., Yokota S. Modeling of radial variations of wood properties in naturally regenerated trees of *Betula platyphylla* grown in Selenge, Mongolia. J. of Wood Science, 2021, v. 67, article 61. <https://doi.org/10.1186/s10086-021-01993-5>
- [39] Wentzel M., Pesenti H., Droppelmann F., Rolleri A. Thinning wood properties of *Nothofagus alpina* under three different silvicultural conditions. Maderas. Ciencia y Tecnología, 2024, v. 26, article 7. <https://doi.org/10.22320/s0718221x/2024.07>
- [40] Cahuana L.A.P., Piña E.A.G., Tuesta G.P., Tomazello-Filho M. Radial variation of wood density and fiber morphology of two commercial species in a tropical humid forest in southeastern Peru. CERNE, 2023, v. 29, article e-103143. DOI: 10.1590/01047760202329013143
- [41] Liepinš K., Liepinš J., Ivanovs J., Bardule A., Jansone L., Jansons A. Variation in the basic density of the tree components of gray alder and common alder. Forests, 2023, v. 14, article 135. <https://doi.org/10.3390/f14010135>
- [42] Riki J.T.B., Adeyemo S.M., Majekobaje A.R., Oyelere A.T., Oluwadare A.O. Density variation in axial and radial positions of Caribbean pine (*Pinus Caribaea* Morelet) grown in Afaka, Nigeria. J. of Agriculture and Environment, 2019, v. 15, no. 2, pp. 163–171.
- [43] Demol M., Calders K., Krishna Moorthy S.M., van den Bulcke J., Verbeeck H., Gielen B. Consequences of vertical basic wood density variation on the estimation of aboveground biomass with terrestrial laser scanning. Trees – Structure and Function, 2021, v. 35, pp. 671–684. <https://doi.org/10.1007/s00468-020-02067-7>
- [44] Sseremba O.E., Mugabi P., Banana A.Y., Wessels B.C., Plessis M. Variation of basic density, calorific value and volumetric shrinkage within tree height and tree age of Ugandan grown *Eucalyptus grandis* wood. J. of Forestry Research, 2021, v. 32, pp. 503–512. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01141-7>
- [45] Ribeiro M.D.S.B., Rodrigues S.A., Ballarin A.W. Multivariate association of wood basic density with site and plantation variables in *Eucalyptus* spp. Canadian J. of Forest Research, 2020, v. 50, no. 2, pp. 193–202. <http://hdl.handle.net/11449/201527>
- [46] Repola J., Lindblad J., Heikkinen J. Pulpwood green density prediction models and sampling-based calibration. Silva Fennica, 2021, v. 55, no. 4, article 10539. <https://doi.org/10.14214/sf.10539>
- [47] Baez S., Fadrique B., Feeley K., Homeier J. Changes in tree functional composition across topographic gradients and through time in a tropical montane forest. PLoS ONE, 2022, v. 17, no. 4, article e0263508. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0263508>
- [48] Que Q., Ouyang K., Li C., Li B., Song H., Li P., Pian R., Li H., Chen X., Peng C. Geographic variation in growth and wood traits of *Neolamarckia cadamba* in China. Forestry Research, 2022, v. 2, article 12. <https://doi.org/10.48130/FR-2022-0012>
- [49] Bouslimi B., Koubaa A., Bergeron Y. Regional, site, and tree variations of wood density and growth in *Thuja occidentalis* L. in the Quebec forest. Forests, 2022, v. 13, article 1984. <https://doi.org/10.3390/f13121984>
- [50] Shchekalev R.V., Danilov D.A., Zaytsev D.A., Korchagov S.A., Melekov V.I. Variation of physical and mechanical properties of *Pinus sylvestris* L. wood in the boreal zone of the European Northeast. South-East European Forestry, 2023, v. 14, no. 2, pp. 197–213. <https://doi.org/10.15177/seefer.23-18>
- [51] Vaughan D., Auty D., Kolb T.E., Meador A.J.S., Mackes K.H., Dahlen J., Moser W.K. Climate has a larger effect than stand basal area on wood density in *Pinus ponderosa* var. *scopulorum* in the southwestern USA. Annals of Forest Science, 2019, v. 76, no. 3, article 85. DOI: 10.1007/s13595-019-0869-0
- [52] Wylie R.R.M., Woods M.E., Dech J.P. Estimating stand age from airborne laser scanning data to improve models of black spruce wood density in the boreal forest of Ontario. Remote Sensing, 2019, v. 11, article 2022. DOI: 10.3390/rs11172022
- [53] Šilinskas B., Varnagiryte-Kabašinskiene I., Aleinikovas M., Beniušiene L., Aleinikoviene J., Škema M. Scots pine and Norway spruce wood properties at sites with different stand densities. Forests, 2020, v. 11, no. 5, article 587. DOI: 10.3390/F11050587
- [54] Balasso M., Hunt M., Jacobs A., O'Reilly-Wapstra J. Characterisation of wood quality of *Eucalyptus nitens* plantations and predictive models of density and stiffness with site and tree characteristics. Forest Ecology and Management, 2021, v. 491, article 118992. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118992>
- [55] Tonouewa J.F.M.F., Biaou S.S.H., Assede E.S.P., Langbour P., Balagueman O.R. Influence of growth parameters on wood density of *Acacia auriculiformis*. Maderas. Ciencia y Tecnología, 2022, v. 24, article 19. <https://doi.org/10.4067/s0718-221x2022000100419>
- [56] Yang H., Stereńczak K., Karaszewski Z., Carvalhais N. Similar importance of inter-tree and intra-tree variations in wood density observations in Central Europe. EGU sphere, 2024. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-2691>
- [57] Marden M., Lambie S., Burrows L. Species-specific basic stem-wood densities for twelve indigenous forest and shrubland species of known age, New Zealand. New Zealand J. of Forestry Science, 2021, v. 51, article 1. <https://doi.org/10.33494/nzjfs512021x121x>

- [58] Magalhães T.M. Effects of site and tree size on wood density and bark properties of Lebombo ironwood (*Androstachys johnsonii* Prain). *New Zealand J. of Forestry Science*, 2021, v. 51, article 3. <https://doi.org/10.33494/nzjfs512021x32x>
- [59] Kowaluk G., Szymanowski K., Kozłowski P., Kukula W., Sala C., Robles E., Czarniak P. Functional assessment of particleboards made of apple and plum orchard pruning // *Waste and Biomass Valorization*, 2020, v. 11, pp. 2877–2886. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-00568-8>
- [60] Yoshioka T. Current situation and future outlook of forest biomass production and its utilization in Japan. *Biotechnological Applications of Biomass* / Eds. T.P. Basso, T.O. Basso, L.C. Basso. London: IntechOpen, 2021, pp. 129–147. DOI: 10.5772/intechopen.93433
- [61] Usoltsev V.A. *Fitomassa model'nykh dereviev dlya distantsionnoy i nazemnoy taksatsii lesov Evrazii* [Single-tree biomass data for remote sensing and ground measuring of Eurasian forests]. Yekaterinburg: Botanical Garden of Ural Branch of RAS, Ural State Forest Engineering University, 2023. <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12451>
- [62] Usoltsev V.A. Stem taper, density and dry matter content in biomass of trees growing in Central Eurasia. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, Botanical Garden of Ural Branch of RAS, 2020. <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/9649>
- [63] Karaban A.A., Usoltsev V.A., Tretyakov S.V., Koptev S.V., Paramonov A.A., Tsvetkov I.V., Davydov A.V., Tsepordey I.S. *Biomassa dereviev ol'khi seroy i ee allometricheskie modeli v usloviyakh Arkhangel'skoy oblasti* [Biomass of gray alder trees and its allometric models in the conditions of the Arkhangelsk region]. *Lesa Rossii i khozyaystvo v nikh* [Forests of Russia and the economy in them], 2023, no. 2, pp. 42–50. DOI: 10.51318/FRET.2023.36.20.005
- [64] Usoltsev V.A., Shobairi O., Tsepordey I.S., Zukow W. Allometric models to predicate single-tree biomass in the Eurasian *Larix* spp. forest. *Ecological Questions*, 2021, v. 32, no. 1, pp. 29–36. <http://dx.doi.org/10.12775/EQ.2021.003>

Authors' information

Usoltsev Vladimir Andreevich✉ — Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Leader Resercher of the Botanical Garden of the Ural Branch of the RAS, Professor of the Ural State Forestry Engineering University, Usoltsev50@mail.ru

Plyukha Nikolay Ivanovich — pg. of the Ural State Forestry Engineering University, nikcskript@mail.ru

Tsepordey Ivan Stepanovich — Cand. Sci. (Agriculture), Senior Resercher of the Botanical Garden of the Ural Branch of the RAS, ivan.tsepordey@yandex.ru

Received 07.03.2024.

Approved after review 22.08.2024.

Accepted for publication 06.09.2024.

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

ЛЕСОВОСТАНОВИТЕЛЬНЫЕ СУКЦЕССИИ И ОСНОВЫ ИХ СОВРЕМЕННОЙ СИСТЕМАТИЗАЦИИ

С.Г. Глушко^{1✉}, Н.Б. Прохоренко²

¹ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет», 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 65

²ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18

glushkosg@mail.ru

Рассмотрены существенные изменения, происходящие в лесном фонде Республики Татарстан. Сделан вывод о широком распространении смен коренных лесных сообществ на производные с преобладанием пионерных и серийных видов растений. Выявлен незавершенный характер восстановительных смен, идущих в обследованных лесах. Дана авторская трактовка факторов, обуславливающих преобладание производных лесных сообществ и незавершенный характер восстановительных смен распространенных в современных лесах. Указана неустойчивость современных так называемых устойчиво-производных лесных сообществ. Представлены результаты исследования лесных сукцессий. Предлагается лесные сукцессии с наблюдаемым восстановлением коренных и условно-коренных лесов относить к типовым восстановительным, в случаях, когда восстановление коренных сообществ не поддается прогнозированию и затягивается на неопределенное время — к устойчиво-восстановительным. Возрастные сукцессии отнесены к коренным лесам. Типовые восстановительные сукцессии приурочены к лесам коротко-производным или длительно-производным, с соответствующими типовыми коротко-восстановительными и длительно-восстановительными сукцессиями. Сукцессии устойчиво-восстановительные установлены для устойчиво-производных лесов. Необратимо-производные леса с необратимыми сукцессиями отнесены к перспективным объектам систематизации современных лесовосстановительных процессов.

Ключевые слова: лесные сукцессии, восстановление лесов, устойчивость, производительность лесов

Ссылка для цитирования: Глушко С.Г., Прохоренко Н.Б. Лесовосстановительные сукцессии и основы их современной систематизации // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 5. С. 19–29.
DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-19-29

Повсеместная смена типично-коренных лесов на производные сопровождается широким распространением лесовосстановительных сукцессий, которые отличаются от обычных для коренных лесов возрастных смен и заслуживают дальнейшего исследования. Нами отмечена необходимость классификации современных лесных сукцессий с подразделением на типовые (успешные), и незавершенные [1]. Успешные сукцессии описаны в работах [2, 3]. Сведения о естественных и антропогенных сменах в лесах имеются в трудах корифеев отечественной лесной науки [4–7] и мн. др. исследователей.

Лесовосстановительные смены в той или иной мере идут во всех производных лесах, а успешность и завершенность наблюдаемых смен во многих случаях вызывает сомнения. Современные восстановительные сукцессии, господствующие на обширных «освоенных» территориях, часто приобретают незавершенный характер, на поздних этапах которых наблюдаются не коренные или условно-коренные, а устойчиво-производные, а также необратимо-производные лесные сообщества. Раннесукцессионные лесные сообщества формируются

различными лесообразователями, как правило, с преобладанием пионерных пород эксплерентной конституции (стратегия жизни). Позднесукцессионные лесные сообщества в типовых сукцессионных рядах сформированы породами виолентной конституции с выработанным соотношением пород — доминантов «коренного леса» [3]

Позднесукцессионные лесные сообщества, расположенные в сукцессионных рядах, имеющих незавершенный характер, отличаются значительным участием серийных и пионерных пород. Восстановление позиций главных пород (основных эдификаторов) «коренного леса» зачастую затягивается, отмечается невыработанность лесных сообществ. Оценка лесовосстановительных сукцессий, приобретающих устойчиво-незавершенный характер с формированием устойчиво-производных невыработанных лесных сообществ, определяется как актуальная.

Цель работы

Цель работы — оценка устойчиво-производных лесов на стадиях устойчиво-восстановительных сукцессий с указанием их места в ряду основных лесных сукцессий, распространенных в современных лесах.

Материалы и методы

В ходе исследований нам предстояло решить некоторые задачи, в частности, описать устойчиво-производные лесные сообщества, формирующиеся на месте деградированных дубрав в зоне хвойно-широколиственных лесов Республики Татарстан. Хвойно-широколиственные леса занимают северную часть Татарстана [8, 9]. Регион относится к хозяйственно освоенным, площади лесов за последние два века сократились втрое [8]. По итогам государственного межевания земель 1800 г., лесистость в пределах современных границ Татарстана составляла 54,4 %. К 1800 г., несмотря на массовое сведение и распашку лесных земель, в Среднем Поволжье сохранялись участки условно-коренных лесов, корабельные рощи, и лесные ресурсы, достаточные для заготовки лесоматериалов и работы Казанского адмиралтейства [8].

На 2022 г. лесистость в Республике Татарстан составляла 17,6 %. Остатки дубрав в структуре лесного фонда занимают 163,8 тыс. га, или 13,9 % покрытой лесом площади. Большая часть дубрав сведена в процессе хозяйственного освоения или сменилась на производные мягколиственные насаждения. Устойчиво-производные леса, сменяющие коренные дубравы на значительной части Среднего Поволжья, выбраны в качестве основного объекта исследований [1].

Большое значение для оценки современного состояния и динамики лесов имеет использование лесоводственных свойств растений [10], и их сообществ, обобщенных в понятии «информационный потенциал» [11]. Комплексная характеристика поведения видов или лесообразующих пород в лесном сообществе обусловлена процессами адаптации [2]. Взаимодействие видов лесных растений с окружающими природными условиями формирует так называемый вызов по А.Дж. Тойнби [12] или, иначе говоря, формирует адаптивно обусловленную необходимость проявления соответствующих свойств [10, 11]. Проявления лесоводственных свойств взаимосвязаны с условиями природной среды, с лесорастительными условиями. Для оценки соответствия условий природной среды проявляемым лесоводственным свойствам нами использовано понятие выработанности лесов.

Механизм проявления лесоводственных свойств интересен в качестве основы для отбора приспособлений, соответствующих проявляемым свойствам. Хаос мутаций и изменения природной среды могут привести к утрате отдельными признаками приспособительного значения (рудименты и атавизмы). Изначально отбор признаков, имеющих приспособительно-адаптивное значение, обуславливался необходимостью проявления соответствующих (адаптивных) свойств.

В связи с этим считаем актуальным обобщение всех свойств лесных биосистем и биогеосистем (как проявленных, так и непроявленных) в понятие «информационный потенциал» [11].

В настоящей работе применены общепринятые методики полевых лесоводственно-геоботанических исследований [13], а также сведения о закономерностях фитосоциального поведения растений и их сообществ [4].

В пригородах Казани были заложены пробные площади (ПП). При закладке ПП использовались требования отраслевого стандарта (ОСТ 56–69–83. Площади пробные...). Обобщение собранных сведений проведено на основе известных работ [2–5, 13–16, 17–20] и др.

Результаты и обсуждение

В 2014–2022 гг. в окрестностях Казани, в урочище «Дубравное», в целях исследований нами были заложены ПП. На ПП описаны фрагменты — этапы (стадии) восстановительного процесса, обычного для дубравных условий Татарстана и некоторых иных регионов Среднего Поволжья (табл. 1–3).

В функционировании сложных систем высока вероятность случайных изменений, они определяют высокий уровень разнообразия раннесукцессионных лесных сообществ [3]. Пионерные леса в дубравных условиях представлены разнообразными осиновыми, березовыми и липовыми сообществами. Богатство дубравных условий предопределяет смешанный состав и сложную структуру формирующихся здесь пионерных древостоев. В условиях района закладки ПП (урочище Дубравное) дубняки массово сменились березняками. В составе образовавшихся вторичных (производных) древостоев преобладает береза повислая (*Betula pendula* Roth), заметны участие осины (*Populus tremula* L.) и накопление разновозрастных поколений липы сердцевидной (*Tilia cordata* Mill.).

Описан этап лесовосстановительной сукцессии на ПП № 1-2019 (см. табл. 1), когда пионерный древостой березы постепенно сменяется разновозрастным устойчивым липняком. Охарактеризованы поздне-сукцессионные устойчиво-производные липняки на ПП № 2-2019, № 3-2019 (см. табл. 2, 3), возникшие на месте деградированных дубрав.

Дуб черешчатый (*Quercus robur* L.) отсутствует в подросте и его восстановление в обозримой перспективе не просматривается. Подобные липняки обычны для Республики Татарстан и иных регионов.

Дуб монгольский (*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb.) на Дальнем Востоке, проявляя качества «эксплорента» на ранних этапах своего онтоге-

Т а б л и ц а 1

**Таксационная характеристика березового древостоя,
пробная площадь № 1-2019 (класс бонитета II)**

Taxation characteristics of birch stand, sample area No. 1-2019 (growth class II)

Породный состав	Возраст, лет	Количество деревьев, шт.	Средний диаметр стволов, см	Средняя высота стволов, м	Полнота абсолютная, м ² /га	Полнота относительная	Запас стволовой древесины, м ³ /га	
							растущей	сухостоя
6 Б	80	155	32,3	25,0	12,700	0,3884	145,20	10,48
2 Лп	70	61	28,6	21,0	3,900	0,1104	37,40	0,55
1 Лп	50	142	16,0	15,0	2,860	0,1048	21,80	1,48
1Д	130	12	52,0	24,0	2,550	0,0737	27,48	–
+ Ос	70	10	36,8	26,0	1,100	0,0272	10,10	4,00
Итого		380	–	–	23,110	0,7045	241,98	16,51

Т а б л и ц а 2

**Таксационная характеристика липового древостоя,
пробная площадь № 2-2019 (класс бонитета II)**

Taxation characteristics of linden stand, sample area No. 2-2019 (growth class II)

Породный состав	Возраст, лет	Количество деревьев, шт.	Средний диаметр стволов, см	Средняя высота стволов, м	Полнота абсолютная, м ² /га	Полнота относительная	Запас стволовой древесины, м ³ /га	
							растущей	сухостоя
4 Лп	80	91	32,3	23,0	7,460	0,2011	78,00	2,00
2 Лп	60	219	18,6	17,0	5,980	0,1990	47,80	1,00
3 Б	90	64	36,0	25,0	6,540	0,2000	72,60	18,00
1 Кл	50	93	16,8	15,0	2,072	0,0900	14,08	–
Д	150	5	56,8	24,0	1,200	0,0347	13,00	3,50
Итого		472	–	–	23,525	0,7248	225,48	24,50

Т а б л и ц а 3

**Таксационная характеристика липово-дубового древостоя,
пробная площадь № 3-2019 (класс бонитета II)**

Taxation characteristics of linden-oak stand, trial area No. 3-2019 (growth class II)

Породный состав	Возраст, лет	Количество деревьев, шт.	Средний, диаметр стволов, см	Средняя высота стволов, м	Полнота абсолютная, м ² /га	Полнота относительная	Запас стволовой древесины, м ³ /га	
							растущей	сухостоя
3 Д	60	112	22,6	20,5	4,540	0,151	47,00	1,92
6 Лп		380	20,3	21,0	12,323	0,374	118,45	18,50
1 Кл		137	14,4	13,0	2,255	0,122	14,02	–
Итого		629	–	–	19,118	0,647	179,47	20,42

неза, оказался способным к захвату обширных территорий. Благодаря последующему превращению в «абиотического пациента» низкоствольный дуб закрепляется на склонах дальневосточных сопков, образуя дериваты кедрово-дубовых лесов и формируя обширную зону дальневосточных широколиственных (дубово-липовых) лесов [21].

Дуб черешчатый в Среднем Поволжье оказался менее пластичным, и хотя доля низкоствольных дубрав в твердолиственном хозяйстве Татарстана достигает 30 %, дуб постепенно уступает свои позиции идущей ему на смену липе. Южная полоса зоны хвойно-широколиственных лесов [9] в Среднем Поволжье постепенно распадается на

составляющие, в которых хвойные и широколиственные компоненты существуют отдельно, а формируемая зона вторичных, т. е. производных широколиственных лесов — представлена преимущественно липняками и низкоствольными дубравами [17].

Смешанный дубово-липовый лес с примесью березы и клена на ПП № 1-2019, № 2-2019 (см. табл. 1, 2) естественного происхождения. Древостой одноярусный, простой, средневозрастной, класс бонитета — II. На ПП № 3-2019 дуб сохраняет господствующие позиции. Это свидетельствует об относительно успешном восстановлении дубрав в районе проведения исследований.

Породный состав подроста на ПП № 2-2019, № 3-2019 — смешанный, преобладают клен и липа. Дуб в подросте встречается редко — от плюсовых значений (+) до одной единицы — только в составе мелкого и среднего подроста. Его количество примерно одинаково — 9,7 тыс. шт./га на ПП № 2-2019, и 10,2 тыс. шт./га на ПП № 3-2019. Постепенно накапливается благонадежный подрост липы, которого достаточно для успешного возобновления данной породы.

Хорошее состояние дуба в древостое на ПП № 3-2019 достигнуто благодаря соблюдению следующих классических правил выращивания: «с открытой головой», «в шубе». «Открытая голова» у дуба обеспечивается невысокой (средней) полнотой, отсутствием сильного затенения. «Шуба» в данном случае работает как подгон, устраняющий излишнее развитие боковых ветвей, обеспечивается липой, сопутствующей дубу и имеющей близкие показатели хода роста. При необходимом уходе возможно успешное воспроизводство дубрав искусственного происхождения. В некоторых лесничествах обнаружены участки образцово-показательных культур дуба — на заложенной нами ПП № 4-2014 в 50-летних высококачественных культурах дуба (квартал 34 Янтыковского участкового лесничества Лаишевского лесничества Республики Татарстан) (табл. 4).

Смешанный березово-дубовый с небольшой примесью липы лес на ПП № 4-2014 (см. табл. 4), искусственного происхождения. Дуб высокого качества, подгон из березы и липы обеспечивает хорошую очищаемость древесных стволов дуба от сучьев. В 2004 г. на участке ПП № 4-2014 были проведены рубки ухода.

На ПП № 3-2019 и № 4-2014 можно констатировать успешное воспроизводство высококачественных дубрав с участием мягколиственных пород. Вместе с тем успешность воспроизводства дубрав в регионе зависит от тщательного соблюдения технологии выращивания культур, своевременного проведения мероприятий по уходу за насаждениями дуба различного происхождения.

Дуб периодически восстанавливает свое преобладание в широколиственных лесах, благодаря реализации виолентной и пациентной стратегии, т. е. за счет продолжительности жизни, теневыносливости и т. д. (табл. 5).

При должном уходе создаются необходимые условия для воспроизводства высококачественных дубрав (см. табл. 4, 5), наблюдаются типовые или успешные сукцессии. При отсутствии рубок ухода дуб, находясь под загущенным пологом пионерно-серийных мягколиственных древостоев, растет плохо. Сменяющие дубравы лесные сообщества представлены преимущественно устойчиво-производными липняками и березняками

(см. табл. 1, 2) с устойчиво-восстановительными сукцессиями.

Участие лесообразующих пород на разных этапах сукцессионного развития (см. табл. 1–5) обусловлено особенностями их фитосоциального поведения, фитоценоотипом или стратегией жизни. Береза и тем более осина как пионерные породы не образуют повторных (подпологовых) поколений и постепенно выпадают из состава лесных сообществ, причем осина, будучи типичным пионером, раньше березы. Береза участвует в составе серийных сообществ, сменяющих пионерные, и даже присутствует на поздних этапах лесных сукцессий, проявляя качества серийной породы, переходной от пионеров (эксплерентов) к породам виолентам. Липа выступает как порода «коренного леса», накапливая под пологом пионерного древостоя несколько поколений, заметно участвуя в подросте и постепенно формируя устойчивый липняк. Дуб и клен присутствуют в пионерных сообществах (см. табл. 1, 2) в качестве пород-ассектаторов.

В целом на пробных площадях представлены разные этапы лесовосстановительной сукцессии. Анализ проявляемых всеми лесообразующими породами свойств позволяет констатировать формирование на месте деградированных дубрав производных березняков, сменяющихся устойчиво-производными липняками. Лесовосстановительный процесс на ПП № 1-2019, № 2-2019 носит незавершенный характер, восстановление господствующих позиций дуба не просматривается.

В соответствии с учением о типах жизненных стратегий [2, 4, 10] дуб черешчатый (и дуб монгольский) следует отнести к видам-виолентам. Лесоводственные свойства, проявляемые этим дубом в условиях Среднего Поволжья, разнообразны и наряду с типичной виолентностью проявляются пациентность и даже некоторая эксплерентность [1, 10, 11].

Перечет деревьев показывает повышенное участие низкоствольного дуба в дубравах региона. Дуб даже в посадках часто принимает форму, свойственную порослевым деревьям, имеет широкую низкопосаженную крону, подвержен заболеваниям, отличается низкой товарностью и относительно коротким жизненным циклом. Порослевой дуб на ранних этапах онтогенеза проявляет относительную эксплерентность, заключающуюся в ускоренном приросте, резком снижении качества древесины, сокращении сроков созревания. На поздних этапах онтогенеза дуб проявляет пациентность с резким замедлением показателей прироста.

Согласно материалам лесоустройства, низкоствольность значительной части насаждений дуба в Среднем Поволжье составляет до 30 %,

Т а б л и ц а 4

**Таксационная характеристика дубового древостоя,
пробная площадь № 4-2014 (класс бонитета II)**

Taxation characteristics of oak stand, sample area No. 4-2014 (growth class II)

Породный состав	Возраст, лет	Количество деревьев, шт.	Средний диаметр стволов, см	Средняя высота стволов, м	Полнота абсолютная, м ² /га	Полнота относительная	Запас ствольной древесины, м ³ /га	
							растущей	сухостоя
7 Д	50	470	17,6	17,0	14,720	0,547	126,67	3,12
3 Б		120	21,7	21,0	5,120	0,184	47,35	11,50
+ Лп		57	16,4	15,0	1,150	0,043	8,52	2,10
Итого		647	–	–	20,990	0,774	182,54	16,72

Т а б л и ц а 5

**Таксационная характеристика дубово-липового древостоя,
пробная площадь № 5-2022 (класс бонитета II)**

Taxation characteristics of oak-lime stand, sample area No. 5-2022 (growth class II)

Породный состав	Возраст, лет	Количество деревьев, шт.	Средний диаметр стволов, см	Средняя высота стволов, м	Полнота абсолютная, м ² /га	Полнота относительная	Запас растущей древесины, м ³ /га
I ярус (интервал высот: 20,1...30,0 м)							
5 Д	130	33	54,9	24,0	7,822		92,85
4 Лп	80	92	31,4	22,0	7,149		69,45
1 Б	90	9	50,6	27,0	1,812		24,20
Итого по I ярусу		134	–	–	16,783	0,485	186,50
II ярус (интервал высот: 17,1...20,0 м)							
8 Лп	60	130	21,7	19,0	4,800		42,74
2 Кл		28	23,8	18,0	1,245		11,96
Итого по II ярусу		158	–	–	6,045	0,186	54,70
III ярус (интервал высот: 9,0...17,0 м)							
6 Лп	40	134	14,0	15,0	2,059		15,24
4 Кл		72	14,3	14,0	1,152		8,24
Итого по III ярусу		206	–	–	3,211	0,118	23,48
Всего на пробной площади		498	–	–	26,039	0,789	264,68

таксируется низкая сохранность и неудовлетворительное состояние многих культур дуба, товарность дубрав явно завышена. Массовое появление порослевых и низкоствольных дубрав — это своеобразная реакция на формирующиеся условия местообитания, условия, провоцирующие эксплерентное (пионерное) поведение растений и их сообществ.

Проявление эксплерентности (эксплерентное поведение) наблюдается повсеместно у многих лесообразующих пород — ускоренный рост сочетается с быстрым созреванием и относительно ранней гибелью, часто как массовое усыхание древостоев.

Ускоренный рост и затяжная вегетация растений обуславливают плохую подготовленность слабодревесневших тканей к зиме и массовое вымерзание дубрав в Республике Татарстан, а также гибель лесных культур кедра сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour) в Приморском крае. Быстрый рост (особенно в культурах), плохая

адаптированность к биоусловиям интенсивно формирующегося лесного сообщества (в возрасте 20...30 лет) наряду со слабой способностью к патиентности становятся причинами деградации культур сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.).

Эксплерентность, способность к пионерному поведению проявляют практически все лесные растения и их сообщества в той мере, в какой это соответствует их информационному потенциалу (проявленным и скрытым лесоводственным свойствам). Доминирование одной лесообразующей породы на разных этапах лесных сукцессий с существенным изменением стратегии характерно для относительно упрощенных сообществ северной тайги (лиственничников), а также для устойчивых дериватов на месте дубрав.

Леса Среднего Поволжья и других регионов демонстрируют многочисленные (сложные) проявления лесоводственных свойств в ходе реализации различающейся стратегии жизни [22–24].

Например, лесоводственные свойства дуба черешчатого способствуют его адаптации к тем или иным условиям. Их можно рассматривать как объекты лесоводственных исследований в первую очередь [25–27].

Лесоводственные свойства — это совокупность свойств, присущих лесному виду (лесообразующей породе) в его стратегии жизни и проявляемых во времени (онтогенез, сукцессия) и в пространстве (ареал). Информационный потенциал объединяет все свойства различных частей биоты — как проявленные в жизненной стратегии, так и непроявленные (скрытые). Все свойства исследуются при тщательном рассмотрении приспособлений, признаков, а также основных закономерностей проявления свойств рассматриваемого вида.

Информационный потенциал у разных видов различается объемом (емкостью), соотношением скрытых и проявляемых свойств, соответствием условиям местообитания — природной среде. Эксплерентное поведение, проявление пионерных свойств в ходе реализации жизненной стратегии отражают высокую степень соответствия вида к условиям природной среды, формируемым преимущественно абиотическими средообразующими факторами (абиосреда). Для природной среды, преобразуемой биотическими факторами (биосреда), в большей степени соответствует поведение виолентное и отчасти пациентное (биотические пациенты).

Относительная эксплерентность, проявление жизненной стратегии, обычной для представителей пионерно-серийных лесных сообществ (осина, береза), заключается в увеличенной энергии роста, повышении класса бонитета, укорачивании жизненного цикла и массовых распадах древостоев основных лесообразующих пород. Эксплерентность (и абиотическая пациентность) основных лесообразователей Среднего Поволжья, проявляемая индивидуально и в сообществах, объясняется масштабными разрушениями лесной биоты и, соответственно, возрастанием роли абиотических средообразующих факторов в лесообразовательном процессе. В рассматриваемом регионе сформированы новые лесорастительные условия — с резко заниженным участием лесной биоты в средообразовательных процессах, с повсеместным проявлением пионерных (эксплерентных) лесоводственных свойств практически всеми основными лесообразователями. Отдельные старые растения с пациентным поведением («выносливцы» по Л.Г. Раменскому), можно отнести к так называемым абиотическим пациентам, которые с трудом приспосабливаются к складывающимся условиям природной среды (преимущественно абиосреды).

Снижение лесистости и разрушение лесной биоты приводят к формированию условий, образно говоря, «глобальной вырубке» [10, 11], т. е. практически все лесообразующие породы, адаптируясь к абиотической среде, проявляют эксплерентные качества. Хозяйственно ценные хвойные и твердолиственные породы (в основном виоленты) отстают в энергии роста от мягколиственных пород (эксплерентов) и уступают им свои позиции. Значительная часть ценных лесных культур, не получив должного ухода, зарастает мягколиственными породами, списывается или переводится в подпологовые культуры.

В структуре лесного фонда увеличивается значение достаточно устойчивых серийных и производных лесов с высоким участием пионерно-серийных пород на всех этапах лесных сукцессий. Породный состав и возрастная структура древостоев подвержены существенным изменениям [10, 28].

Разрушение биоты на региональном (надсистемном) уровне увеличивает значение абиофакторов в формировании условий природной среды всего региона. Господство абиосреды «диктует» эксплерентное поведение всем подсистемам рассматриваемых регионов (надсистем). Эксплерентность в данном случае есть адаптивное проявление растениями свойств, соответствующих абиосреде, вполне обычное не только на отдельных участках-подсистемах (вырубках, гарях) но и, возможно, в крупных регионах-надсистемах с уничтоженной биотой.

Информация о складывающихся в надсистеме условиях передается всем ее подсистемам, в том числе даже относительно стабилизированным — в пределах особо охраняемых природных территориях (ООПТ) или на особо защитных участках леса (ОЗУ). Скорость и интенсивность передачи информации по уровням системной организации имеет свои особенности. Сравнительно быстро и со сходными последствиями информация о воздействии на лесные системы распространяется в системах, близких типологически (геохорах), а наиболее интенсивная передача информации — в системах, близких территориально (геомерах) [16].

Передача информации на разные уровни системной организации лесной биоты может быть выявлена по изменениям лесорастительных условий или по стратегии жизни основных лесообразующих пород. Оценка лесов по наличию или отсутствию преобладающих, эдификаторных и индикаторных видов должна дополняться использованием индикационных возможностей типов стратегии, что, по нашему мнению, актуально для решения научных, учебно-образовательных и хозяйственных задач [10, 11].

Т а б л и ц а 6

Систематизация лесов по их устойчивости (восстанавливаемости)**Systematisation of forests according to their sustainability (regenerability)**

Динамическое состояние леса	Особенности лесных сукцессий	Типы лесных сукцессий	Главная коренная лесообразующая порода	Устойчивость (восстанавливаемость) сообщества
Коренной (девственный)	Возрастные	Типовые	Преобладает в составе сообщества	Устойчивость (восстанавливаемость) сохраняется
Условно-коренной	Восстановительно-возрастные		Доминирует в составе сообщества	
Коротко-производный	Коротко-восстановительные		Эдификатор в составе сообщества	
Длительно-производный	Длительно-восстановительные		Ассектатор в составе сообщества	
Устойчиво-производный	Устойчиво-восстановительные	Незавершенные, производные	Доля участия единична или не прослеживается	Восстанавливаемость утрачивается
Необратимо-производный	Необратимо-восстановительные	Необратимые	Возможны разные варианты участия	Восстанавливаемость утрачена

Стратегия жизни в качестве проявленной информации (свойств растений) выступает индикатором природных условий, формирующихся в результате взаимодействия биотических и абиотических средообразующих факторов, которые участвуют в формировании лесных биогеосистем. Кардинальное изменение жизненной стратегии основными лесными породами отражает процесс формирования новых природных условий и лесных сукцессий, в ходе которых многие лесообразующие породы изменяют свое средообразующее (экологическое) и фитоценотическое значение (табл. 6).

Современные исследования лесных сукцессий, в том числе их систематизация (см. табл. 6), должны исходить из понимания последствий массового разрушения лесной биоты как ведущего средообразующего фактора. Экзогенный и незавершенный характер лесных сукцессий является одним из основных последствий перманентного и в обозримой перспективе необратимого разрушения биоты, формирования антропогенных фрагментов биосферы в так называемых освоенных регионах. В современных лесах наряду с успешными типовыми сукцессиями следует шире использовать понятие о сукцессиях незавершенных, формирующих устойчиво-производные сообщества, чья производность стала устойчивой [29, 30].

Явно назрела потребность классификации лесов производных, с добавлением этих лесов к исходным формациям так называемых лесов коренных [31, 32]. Привязка производных лесов к соответствующим коренным формациям на основе доминантного подхода с построением типовых сукцессий, серий биогеоценозов, восстановительно-возрастных динамических и географо-генетических рядов, может быть выпол-

нена при индикации состояния природной среды по комплексным характеристикам поведения, стратегии, или по проявлениям лесоводственных свойств основными лесообразующими породами. Это весьма перспективное направление исследовательской работы [33, 34].

Фитоиндикация среды по типам стратегии может выполняться с использованием доминантного подхода и соответствующих фитоценоципов установленных в работах известных исследователей [14, 15, 20] и др. Доминирование эксплерентов («шакалов» по Л.Г. Раменскому) свидетельствует о реакции лесной биоты на преобладание абиосреды, а усиление виолентов («львов») отражает восстановление биоты и соответствующее усиление роли биосреды. Оценка динамических процессов в современных лесах опирается на использование пород доминантов, эдификаторов, индикаторных и дифференциальных видов. В условиях массового разрушения биоты возрастает значение фитоценоципов позволяющих учитывать изменяющееся соотношение биотических и абиотических факторов природной среды и лесорастительных условий [35].

Выводы

Практически все восстановительные сукцессии в условиях массового разрушения лесной биоты как ведущего средообразующего фактора приобретают экзогенный характер и существенно отличаются от типовых восстановительных смен наблюдаемых в устойчивых лесах. В условиях утраты лесами устойчивости, восстанавливаемости в исходно-коренное состояние лесовосстановительные процессы приобретают незавершенный характер, а лесообразующие породы изменяют проявляемые ими свойства.

По поведению (проявленным в жизненной стратегии свойствам) дубрав можно судить о масштабах происходящих изменений в лесообразовательных процессах. Понятие об информационном потенциале как совокупности проявленных и скрытых свойств позволяет учесть особенности адаптивной стратегии лесообразующих пород, исследовать происходящие изменения условий местообитания лесов. Поведение или стратегия жизни растений имеют адаптивный характер и поэтому пригодны для индикации состояния природной среды. Свойства биоты и закономерности их проявления лежат в основе эволюции приспособлений, в значительной мере определяя проявление и изменение всех признаков лесной биоты, в том числе типы лесных сообществ.

Развитие фитосоциологии на основе отечественных традиций, а также с привлечением теории экосистем позволит повысить эффективность оценки тенденций современной динамики лесов, что будет способствовать дальнейшему совершенствованию лесохозяйственной отрасли.

Список литературы

- [1] Глушко С.Г. Информационная составляющая лесных биогеосистем. Казань: Бриг, 2020. 144 с.
- [2] Комарова Т.А. К вопросу о закономерностях вторичных сукцессий в лесах Южного Сихотэ-Алиня // Динамические процессы в лесах Дальнего Востока. Владивосток: Изд-во ДВНЦ АН СССР, 1984. С. 21–36.
- [3] Комарова Т.А., Прохоренко Н.Б., Глушко С.Г., Терехина Н.В. Послепожарные сукцессии в лесах Сихотэ-Алиня с участием *Pinus koraiensis* Siebold et Zucc. Методические положения и методические подходы в их изучении. СПб.: Свое издательство, 2017. 402 с.
- [4] Сукачев В.Н. Растительные сообщества (Введение в фитосоциологию). Л.; М.: Книга, 1928. 232 с.
- [5] Колесников Б.П. Генетический этап в лесной типологии и его задачи // Лесоведение, 1974. № 2. С. 3–20.
- [6] Куренцова Г.Э. Естественные и антропогенные смены растительности Приморья и Южного Приамурья. Новосибирск: Наука, 1973. 230 с.
- [7] Мелехов И.С. Лесная типология. М.: МЛТИ, 1976. 73 с.
- [8] Гаянов А.Г. Леса и лесное хозяйство Татарстана. Казань: Идел-Пресс, 2001. 235 с.
- [9] Курнаев С.Ф. Лесорастительное районирование подзоны южной тайги и хвойно-широколиственных лесов европейской части СССР. М.: МЛТИ, 1958. 22 с.
- [10] Глушко С.Г., Галиуллин И.Р., Прохоренко Н.Б. Реализация стратегии лесообразователей в ходе восстановительных сукцессий // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 1. С. 5–12. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-5-12
- [11] Комарова Т.А., Жабько Е.В. Сравнительная оценка экологической толерантности лесных растений в разных регионах Дальнего Востока // Экология, 2011. № 5. С. 344–350.
- [12] Тойнби А.Дж. Исследование истории. М.: АСТ, 2010. 1119 с.
- [13] Сукачев В.Н. Программа и методика биогеоэкологических исследований / под ред. В.Н. Сукачева, Н.В. Дылиса. М.: Наука, 1966. 334 с.
- [14] Раменский Л.Г. Введение в комплексное почвенно-геоботаническое исследование земель. М.: Сельхозгиз, 1938. 620 с.
- [15] Работнов Т.А. Фитоценология. М.: Изд-во МГУ, 1992. 352 с.
- [16] Сочава В.Б. Растительные сообщества и динамика природных систем // Докл. Института географии Сибири и Дальнего Востока, 1968. Вып. 20. С. 12–22.
- [17] Яковлев А.С., Яковлев И.А. Дубравы Среднего Поволжья. Йошкар-Ола: Изд-во Марийского ГТУ, 1999. 351 с.
- [18] Теринов Н.Н., Андреева Е.М., Луганский Н.А. Меры содействия естественному возобновлению в темных хвойных лесах на Среднем Урале // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства, 2016. № 1. С. 4–13.
- [19] Лепехин А.А., Чеканышкин А.С. Рост и жизнеспособность дуба черешчатого в изреженных рубками ухода насаждениях // ИзВУЗ Лесной журнал, 2018. № 6. С. 70–77. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.6.70
- [20] Grimme J.P. Plant strategies and vegetation processes. Chichester; New York: Wiley, 1979, 222 p.
- [21] Добрынин А.П. Дубовые леса Российской Дальнего Востока (биология, география, происхождения) // Труды Ботанических садов ДВО РАН. Т. 3. Владивосток: Дальнаука, 2000. 260 с.
- [22] Сингатуллин И.К., Давлетшин Р.А., Сунгутуллина С.А. Состояние лесных культур ели в лесостепной зоне Республики Татарстан // Лесное хозяйство и рациональное использование природных ресурсов. Казань: Изд-во Казанского ГАУ, 2018. С. 83–87.
- [23] Комарова Т.А., Сибирина Л.А., Ли Д.К., Кан Х.С. Демутационные сукцессии после пожаров в лианово-разнотравношироколиственных широколиственно-кедровых лесах Южного Сихотэ-Алиня // Лесоведение, 2008. № 4. С. 10–19.
- [24] Куянцева Н.Б., Молчанова Д.А., Мумбер А.Г., Веселкин Д.В. Численность проростков из почвенного банка семян сосновых лесов возле Карабашского медеплавильного комбината // Живые системы — 2023. Сборник научных статей II Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвященной 10-летию восстановления экосистем (2020–2030). Саратов: Изд-во Саратовского НГУ им. Н.Г. Чернышевского, 2023. С. 106–109.
- [25] Сингатуллин И.К., Габдуллин Н.Н. Особенности роста древесных пород в лесных культурах, созданных кулисами // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: Материалы XVIII Междунар. науч.-техн. конф., Вологда, 01 декабря 2020 г. Вологда: Изд-во Вологодского государственного университета, 2020. С. 100–103.
- [26] Минниханов Р.Н., Мусин Х.Г., Гибадуллин Н.Ф., Халилов И.И. Искусственные лесные экосистемы: состояние и перспективы развития // Вестник Казанского государственного аграрного университета, 2018. Т. 13. № 3 (50). С. 39–46.
- [27] Ковалев А.П., Алексеенко А.Ю., Лашина Е.В., Качанова Т.Г. Особенности рубок ухода в хвойно-широколиственных лесах Дальнего Востока // Аграрный вестник Приморья, 2020. № 4 (20). С. 47–52.
- [28] Мельник П.Г., Вронская А.М. Динамика видовой и возрастной структуры лесного фонда Никольской лесной дачи // Леса Евразии — Леса Поволжья: Материалы XVII Междунар. конф. молодых ученых, посвященной 150-летию со дня рождения проф. Г.Ф. Морозова, 95-летию Казанского государственного аграрного университета и Году экологии в России, Казань, 22–28 октября 2017 г. М.: Маска, 2017. С. 82–84.
- [29] Мухаметшина А.Р., Шайхразиев Ш.Ш. Изучение состояния ельников Республики Татарстан // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства, 2019. № 2. С. 71–79.

- [30] Sultanova R., Martynova M., Konashova S. Cutting practices in mature stands of *Tilia cordata* Mill // Central European Forestry J., 2020, v. 66, no. 3, pp. 151–158.
- [31] Krestov P.V., Korznikov K.A., Kislov D.E. Profound Changes in Terrestrial Ecosystems in Russia in the 21st Century // Herald of the Russian Academy of Sciences, 2020, v. 90, no. 3, pp. 291–297.
- [32] Kuuluvainen T., Lindberg H., Vanha-Majamaa I., Keto-Tokoi P., Punttila P. Low-level retention forestry, certification, and biodiversity: case Finland // Ecological Processes, 2019, no. 8, p. 47.
- [33] Ульданова Р.А., Сабилов А.Т. Продуктивность дубовых насаждений прибрежных территорий реки Волги // Российский журнал прикладной экологии, 2021. № 3(27). С. 11–22.
- [34] Глушко С.Г., Манюкова И.Г., Прохоренко Н.Б. Восстановление дубрав среднего Поволжья // Вестник Омского государственного аграрного университета, 2017. № 3 (27). С. 56–61.
- [35] Singatullin I.K., Khakimova Z.G., Chernov V., Davletshin R. The influence of climatic factors on the succession processes in the forests of the forest-steppe zone of the Republic of Tatarstan // BIO Web of Conferences, 2020, no. 17, p. 00037.

Сведения об авторах

Глушко Сергей Геннадьевич [✉] — канд. с.-х. наук, доцент кафедры таксации и экономики лесной отрасли, ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет», glushkosg@mail.ru

Прохоренко Нина Борисовна — канд. биол. наук, доцент кафедры ботаники и физиологии растений, ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», nbprokhorenko@mail.ru

Поступила в редакцию 07.03.2024.

Одобрено после рецензирования 24.04.2024.

Принята к публикации 22.08.2024.

REFORESTATION SUCCESSIONS RESEARCH AND ITS MODERN SYSTEMATIZATION BASICS

S.G. Glushko^{1✉}, **N.B. Prokhorenko**²

¹Kazan State Agrarian University, 25, K. Marx st., 420015, Kazan, Russia

²Kazan (Volga region) Federal University, 18, Kremlin st., 420008, Kazan, Russia

glushkosg@mail.ru

Significant changes occurring in the forest area of the Republic of Tatarstan have been studied. It is concluded that primary forest communities are replaced by secondary forest growth, with a predominance of pioneer and seral plant species. The incomplete nature of the restoration taking place in the surveyed forests was revealed. The author's interpretation of the factors determining the predominance of secondary forest communities and the incomplete nature of restoration shifts in modern forests is presented. Attention is drawn to the instability of modern, so-called sustainable-derived forest communities. The study results of reforestation successions are proposed for consideration. It is proposed to classify reforestation successions with observed restoration of primary and conditionally primary forests as typical restoration ones. In cases where the restoration of primary communities cannot be predicted and is delayed indefinitely, these forest successions are proposed to be characterized as sustainable-restorative. Age succession is common in primary forests. Typical restoration successions occur in short-term or long-term forests with corresponding short-regeneration and long-regeneration successions. Sustainable-regenerative successions are characteristic of sustainable-derived forests. Irreversibly derived forests with irreversible successions require further study. We consider it relevant to further systematize forest successions based on the observed results and prospects of forest restoration processes.

Keywords: forest successions, reforestation, sustainability, secondary forest growth

Suggested citation: Glushko S.G., Prokhorenko N.B. *Lesovosstanovitel'nye suksessii i osnovy ikh sovremennoy sistematzatsii* [Reforestation successions research and its modern systematization basics]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 5, pp. 19–29. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-19-29


References

- [1] Glushko S.G. *Informatsionnaya sostavlyayushchaya lesnykh biogeosistem* [Information component of forest biogeosystems]. Kazan': Brig [Publishing and printing company «Brig»], 2020, 144 p.
- [2] Komarova T.A. *K voprosu o zakonmernostyakh vtorichnykh suksessiy v lesakh Yuzhnogo Sikhote-Alinya* [On the patterns of secondary successions in the forests of the South Sikhote-Alin]. *Dinamicheskie protsessy v lesakh Dal'nego Vostoka* [Dynamic processes in the forests of the Far East]. Vladivostok: Far Eastern Scientific Center, Academy of Sciences of the USSR, 1984, pp. 21–36.
- [3] Komarova T.A., Prokhorenko N.B., Glushko S.G., Terekhina N.V. *Poslepozharnye suksessii v lesakh Sikhote-Alinya s uchastiem Pinus koraiensis Siebold et Zucc. Metodologicheskie polozeniya i metodicheskie podkhody v ikh izuchenii* [Post-fire successions in the Sikhote-Alin forests with the participation of *Pinus koraiensis* Siebold et Zucc. Methodological provisions and methodological approaches in their study]. St. Petersburg: Svoe izdatel'stvo [My Publishing House], 2017, 402 p.

- [4] Sukachev V.N. *Rastitelnye soobshestva (Vvedenie v fitosociologiyu)* [Plant communities (Introduction to phytosociology)]. Leningrad–Moscow: Kniga [Book], 1928, 232 p.
- [5] Kolesnikov B.P. *Geneticheskiy etap v lesnoy tipologii i ego zadachi* [The genetic stage in the forest typology and its tasks]. *Lesovedenie* [Russian J. Forest Science], 1974, no. 2, pp. 3–20.
- [6] Kurentsova G.E. *Estestvennye i antropogennye smeny rastitelnosti Primorya i Yuzhnogo Priamurya*. [Natural and anthropogenic changes in vegetation of Primorye and Southern Amur region]. Novosibirsk: Nauka, 1973, 230 p.
- [7] Melekhov I.S. *Lesnaya tipologiya*. [Forest typology]. Moscow: MLTI, 1976, 73 p.
- [8] Gayanov A.G. *Les i lesnoe khozyaystvo Tatarstana* [Forests and forestry of Tatarstan]. Kazan: Idel-Press, 2001, 235 p.
- [9] Kurnaev S.F. *Lesorastitel'noe rayonirovanie podzony yuzhnoy taygi i khvoynno-shirokolistvennykh lesov evropeyskoy chasti SSSR* [Forest-growing zoning of the subzone of the southern taiga and coniferous-deciduous forests of the European part of the USSR]. Moscow: MLTI, 1958, 22 p.
- [10] Glushko S.G., Galiullin I.R., Prokhorenko N.B. *Realizatsiya strategii lesobrazovateley v hode vosstanovitel'nykh sukcesiy* [Implementation of tree species strategy during progressive successions]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 1, pp. 5–12. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-5-12
- [11] Komarova T.A., Zhabyko E.V. *Sravnitel'naya otsenka ekologicheskoy tolerantnosti lesnykh rasteniy v raznykh regionakh Dal'nego Vostoka* [Comparative assessment of environmental tolerance of forest plants in different regions of the Far East]. *Ekologiya* [Ecology], 2011, no. 5, pp. 344–350.
- [12] Toynbee A.J. *Issledovanie istorii* [A Study of History]. Moscow: AST, 2010, 1119 p.
- [13] Sukachev V.N. *Programma i metodika biogeotsenologicheskikh issledovaniy* [Program and methodology of biogeocenological studies]. Eds. V.N. Sukachev, N.V. Dyslis. Moscow: Nauka, 1966, 334 p.
- [14] Ramensky L.G. *Vvedenie v kompleksnoe pochvenno-geobotanicheskoe issledovanie zemel* [Introduction to a comprehensive soil-geobotanical study of land]. Moscow: Selkhozgiz, 1938, 620 p.
- [15] Rabotnov T.A. *Fitotsenologiya* [Phytocenology]. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 1992, 352 p.
- [16] Sochava V.B. *Rastitelnye soobshestva i dinamika prirodnih sistem* [Plant communities and the dynamics of natural systems]. *Dokl. instituta geografii Sibiri i Dalnego Vostoka* [Doc. Institute of Geography of Siberia and the Far East], 1968, iss. 20, pp. 12–22.
- [17] Yakovlev A.S., Yakovlev I.A. *Dubravyy Srednego Povolzh'ya* [Oaklands of the Middle Volga]. Yoshkar-Ola: Mari State Technical University, 1999, 351 p.
- [18] Terinov N.N., Andreeva E.M., Luganskiy N.A. *Mery sodeystviya estestvennomu vozobnovleniyu v temnokhvoynnykh lesakh na Srednem Urale* [Measures to promote natural regeneration in dark coniferous forests in the Middle Urals]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva* [Transactions of the St. Petersburg Forestry Research Institute], 2016, no. 1, pp. 4–13.
- [19] Lepekhin A.A., Chekanyshkin A.S. *Rost i zhiznesposobnost' duba cherechchatogo v izrezhennykh rubkami ukhoda nasazhdeniyakh* [Growth and Vitality of English Oak in Plantations after Improvement Thinning]. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2018, no. 6, pp. 70–77. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.6.70
- [20] Grimme J.P. *Plant strategies and vegetation processes*. Chichester; New York: Wiley, 1979, 222 p.
- [21] Dobrynin A.P. *Dubovyye lesa Rossiyskogo Dal'nego Vostoka (biologiya, geografiya, proiskhozhdeniya)* [Oak forests of the Russian Far East (biology, geography, origin)]. *Tr. Botan. sadov DVO RAN*. T. 3. [Proceedings of the Botanical Gardens of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; vol. 3]. Vladivostok: Dalnauka, 2000, 260 p.
- [22] Singatullin I.K., Davletshin R.A., Sungutullina S.A. *Sostoyaniye lesnykh kul'tur eli v lesostepnoy zone Respubliki Tatarstan* [The state of spruce forest crops in the forest-steppe zone of the Republic of Tatarstan]. *Lesnoe khozyaystvo i ratsional'noe ispol'zovanie prirodnih resursov* [Forestry and rational use of natural resources]. Kazan: Kazan State Agrarian University, 2018, pp. 83–87.
- [23] Komarova T.A., Sibirina L.A., Li D.K., Kan Kh.S. *Demutatsionnyye suksessii posle pozharov v lianovo-raznokustarnikovyykh shirokolistvenno-kedrovyykh lesakh Yuzhnogo Sikhote-Alinya* [Demutational successions after fires in liana-forest-broadleaf-cedar forests of the Southern Sikhote-Alin]. *Lesovedenie*, 2008, no. 4, pp. 10–19.
- [24] Kuyantseva N.B., Molchanova D.A., Mumber A.G., Veselkin D.V. *Chislennost' prorstkov iz pochvennogo banka semyan sosnovyykh lesov vozle Karabashskogo medeplavil'nogo kombinata* [The number of seedlings from the soil seed bank of pine forests near the Karabash copper smelter]. *Zhivyye sistemy — 2023. Sbornik nauchnykh statey II Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoy vosstanovleniyu ekosistem (2020–2030)* [Living systems — 2023. Collection of scientific articles of the II All-Russian scientific conference with international participation dedicated to the decade of ecosystem restoration (2020–2030)]. Saratov: Saratov National Research State University named after N.G. Chernyshevsky, 2023, pp. 106–109.
- [25] Singatullin I.K., Gabdullin N.N. *Osobennosti rosta drevesnykh porod v lesnykh kul'turakh, sozdannykh kulisami* [Features of tree species growth in forest cultures created by curtains]. *Aktual'nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa: Materialy XVIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Actual problems of forest complex development: Proceedings of the XVIII International scientific and technical conference], Vologda, December 01, 2020. Vologda: Vologda State University, 2020, pp. 100–103.
- [26] Minnikhanov R.N., Musin Kh.G., Gibadullin N.F., Khalilov I.I. *Iskusstvennyye lesnye ekosistemy: sostoyaniye i perspektivy razvitiya* [Artificial forest ecosystems: state and development prospects]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Kazan State Agrarian University], 2018, v. 13, no. 3 (50), pp. 39–46.
- [27] Kovalev A.P., Alekseenko A.Yu., Lashina E.V., Kachanova T.G. *Osobennosti rubok ukhoda v khvoynno-shirokolistvennykh lesakh Dal'nego Vostoka* [Features of thinning in coniferous-broadleaf forests of the Far East]. *Agrarnyy vestnik Primor'ya* [Agrarian Bulletin of Primorye], 2020, no. 4 (20), pp. 47–52.
- [28] Mel'nik P.G., Vronskaya A.M. *Dinamika vidovoy i vozrastnoy struktury lesnogo fonda Nikol'skoy lesnoy dachi* [Dynamics of species and age structure of the forest fund of Nikol'skaya forest dacha]. *Les Evrazii — Lesa Povolzh'ya: Materialy XVII Mezhdunar. konf. molodykh uchennykh, posvyashchennoy 150-letiyu so dnya rozhdeniya prof. G.F. Morozova, 95-letiyu Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta i Godu ekologii v Rossii* [Forests of Eurasia — Forests of the Volga

- Region: Proceedings of the XVII Int. Conf. of Young Scientists, dedicated to the 150th anniversary of the birth of prof. G.F. Morozov, the 95th anniversary of the Kazan State Agrarian University and the Year of Ecology in Russia], Kazan, October 22–28, 2017. Moscow: Maska, 2017, pp. 82–84.
- [29] Mukhametshina A.R., Shaykhrayev Sh.Sh. *Izuchenie sostoyaniya el'nikov Respubliki Tatarstan* [Study of the state of spruce forests of the Republic of Tatarstan]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva* [Transactions of the St. Petersburg Forestry Research Institute], 2019, no. 2, pp. 71–79.
- [30] Sultanova R., Martynova M., Konashova S. Cutting practices in mature stands of *Tilia cordata* Mill. *Central European Forestry J.*, 2020, v. 66, no. 3, pp. 151–158.
- [31] Krestov P.V., Korznikov K.A., Kislov D.E. Profound Changes in Terrestrial Ecosystems in Russia in the 21st Century. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2020, v. 90, no. 3, pp. 291–297.
- [32] Kuuluvainen T., Lindberg H., Vanha-Majamaa I., Keto-Tokoi P., Punttila P. Low-level retention forestry, certification, and biodiversity: the case of Finland. *Ecological Processes*, 2019, no. 8, p. 47.
- [33] Ul'danova R.A., Sabirov A.T. *Produktivnost' dubovykh nasazhdeniy pribrezhnykh territoriy reki Volgi* [Productivity of oak plantations in the coastal areas of the Volga River]. *Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii* [Russian J. of Applied Ecology], 2021, no. 3 (27), pp. 11–22.
- [34] Glushko S.G., Manyukova I.G., Prokhorenko N.B. *Vosstanovlenie dubrav srednego Povolzh'ya* [Restoration of oak forests of the middle Volga region]. *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Omsk State Agrarian University], 2017, no. 3 (27), pp. 56–61.
- [35] Singatullin I.K., Khakimova Z.G., Chernov V., Davletshin R. The influence of climatic factors on the succession processes in the forests of the forest-steppe zone of the Republic of Tatarstan. *BIO Web of Conferences*, 2020, no. 17, p. 00037.

Authors' information

Glushko Sergey Gennad'evich  — Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor of the Department of Taxation and Economics of the Forest Industry, Kazan State Agrarian University, glushkosg@mail.ru

Prokhorenko Nina Borisovna — Cand. Sci. (Biology), Associate Professor of the Department of Botany and Plant Physiology, Kazan (Volga Region) Federal University, nbprokhorenko@mail.ru

Received 07.03.2024.

Approved after review 24.04.2024.

Accepted for publication 22.08.2024.

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 МИКРОКЛИМАТА ПОД ПОЛОГОМ СЕВЕРОТАЕЖНЫХ СОСНЯКОВ РАЗНЫХ ТИПОВ ЛЕСА

П.А. Феклистов^{1✉}, Ж.А. Бруева², Е.П. Верховцева², И.Н. Болотов¹

¹ФГБУН «Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаврова Уральского отделения Российской академии наук», Россия, 163020, г. Архангельск, пр. Никольский, д. 20

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

pfeklistov@yandex.ru

Приведены результаты исследования метеофакторов под пологом леса в разных типах северотаежных основных насаждений Архангельской области в древостоях чистых по составу или с небольшой примесью других пород. Рассмотрена подробная методика измерения метеофакторов: освещенности с использованием люксметра «ТКА-Люкс», метеометра МЭС-200 для измерения температуры воздуха, влажности воздуха и скорости ветра. Приведена таксационная характеристика изученных сосняков определенной инструментальным методом. Представлены результаты дисперсионных анализов по влиянию типа леса на метеофакторы под пологом леса. Установлено, что в целом тип леса существенно влияет почти на все показатели микроклимата. Выявлено, что под пологом леса складывается свой климатический режим, что соответственно влияет на все нижние ярусы растительности и отчасти на древостой. Показано, что освещенность и ветер выше в сосняке кустарничково-сфагновом, а температура воздуха выше в сосняке черничном, влажность воздуха одинакова. Установлено, что при сравнении близких типов леса сосняков черничных и черничных влажных метеофакторы близки (равны) за исключением влажности воздуха, она выше в сосняке черничном влажном. Выявлено, что метеорологические факторы под пологом сосняков существенно отличаются от таковых на открытом месте. Показаны отличия метеофакторов по сравнению с открытым местом: освещенность меньше и составляет 21...22 % от открытого места, скорость ветра — 46...76 %, температура воздуха — 92...97 %, влажность воздуха выше и составляет 124...132 %. Установлено, что одно дерево в древостое при существующей густоте задерживает 12...21 лкс света. Проанализировано изменение метеофакторов под пологом леса и до высоты 1,3 м от поверхности земли. Получено, что с высоты 1,3 м от поверхности земли скорость ветра к уровню напочвенного покрова снижается на 10...40 %, освещенность — на 24 %, а температура воздуха несколько повышается до 1,3 °С.

Ключевые слова: метеофакторы, микроклимат, тип леса, температура, освещенность, влажность, скорость ветра

Ссылка для цитирования: Феклистов П.А., Бруева Ж.А., Верховцева Е.П., Болотов И.Н. Особенности микроклимата под пологом северотаежных сосняков разных типов леса // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 5. С. 30–41. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-30-41

Северотаежные сосняки существуют в условиях довольно сурового климата с коротким вегетационным периодом, коротким летом и холодной зимой. Климат района умеренно континентальный с продолжительной холодной многоснежной зимой, короткой весной с неустойчивыми температурами, относительно коротким умеренно теплым увлажненным летом, продолжительной и ненастной осенью.

Среднегодовая температура воздуха +0,8 °С при абсолютном максимуме +35 °С в июле и абсолютном минимуме –48 °С в январе. Среднегодовое количество осадков — 670 мм. Продолжительность вегетационного периода 140 сут. Мощность снежного покрова 68 см. Относительная влажность воздуха 82 %.

Период с отрицательными значениями температуры воздуха длится 215 сут., с температурой –5° — 145 сут., ниже –10° — 98 сут. Период с

положительными значениями температуры продолжается 145 сут., выше 5° — 125 сут., выше 10° — 70 сут.

В целом климатические условия района исследования являются очень суровыми для произрастания и развития древесной растительности в целом и сосняков в частности, отражаясь на всех жизненных процессах, протекающих в основных фитоценозах: на фотосинтезе, дыхании, транспирации, поглощении и передвижении веществ, росте и развитии и в конечном итоге на продуктивности. Данные климатические условия можно принять за константу, поскольку именно они формируют среду произрастания. При этом основные биогеоценозы в свою очередь влияют на микроклимат внутри сообщества, перераспределяя метеофакторы и изменяя их.

Под пологом леса, в том числе в основных насаждениях, формируется микроклимат, существенно отличающийся от климата окружающей открытой местности. На это указывали классики

отечественного лесоводства [1–3]. Микроклимат под пологом леса связан с составом, возрастом, состоянием насаждений, ярусностью, сомкнутостью крон деревьев (полнотой) и прохождением ими фенологических стадий развития. Кроме того, на микроклимат леса оказывают влияние рельеф, экспозиция склона, крупные озера, водохранилища и другие факторы [4, 5]. Климатические факторы воздействуют на все ярусы растительности [6]. При этом важное значение имеет также тип леса, что подтверждают исследования российских и зарубежных авторов [7–12].

Однако научные работы, посвященные оценке влияния различных типов леса на микроклимат под пологом леса, немногочисленны. Известны материалы по микроклимату в ельниках [13], на участках рубок ухода или добровольно выборочных рубок [14, 15]. Проведение подобных исследований имеют существенное значение для обеспечения устойчивого экосистемного управления лесами, особенно в условиях изменяющегося климата [16]. К тому же климатические факторы влияют на сезонное развитие хвойных и фитомассу, продуктивность, запас [17–19], а также на прирост древесины [20, 21], естественное возобновление [22] и адаптационную способность [23].

Каждый тип леса имеет собственные уникальные характеристики, воздействующие на микроклимат. Например, хвойные породы имеют более плотную крону по сравнению с лиственными. Такая крона создает затенение и, соответственно, снижает температуру под пологом леса. В результате микроклимат отличается большими прохладой и влажностью. Напочвенный покров также зависит от типа леса. Например, в хвойных

лесах широко развит мохово-лишайниковый ярус, который хорошо приспособлен к прохладным и влажным условиям. Наоборот, в лиственных лесах напочвенный покров может состоять из трав и кустарников, которые лучше приспособлены к более теплым и сухим условиям [24, 25].

Микроклимат зависит также от возраста деревьев. Молодые деревья обычно имеют плотную крону, которая создает более затененное пространство под пологом леса, что влияет на освещенность, температуру и влажность атмосферного воздуха. С возрастом деревья становятся выше, их крона становится менее плотной, что позволяет большему объему света проникать под полог леса и улучшать микроклимат [26, 27].

Микроклимат под пологом леса изменяется в зависимости и от погодных условий. Осадки в виде дождя, снега, а так же ветер могут изменять температуру и влажность воздуха, освещенность под пологом леса и на поверхности почвы, что либо прямо, либо косвенно влияет на рост и развитие растительности, прежде всего на молодые растения.

Цель работы

Цель работы — изучение особенностей микроклимата под пологом сосняков различных типов в сосновых насаждениях северной тайги в Архангельской области.

Материалы и методы

Для изучения влияния типа леса на микроклимат под пологом древостоев были заложены пробные площади в сосновых насаждениях, чистых по составу или с небольшой примесью других пород в различных типах леса: сосняках черничных,

Т а б л и ц а 1

Таксационная характеристика древостоя пробных площадей

Taxation characteristics of the stand in the sample plots

№ пробной площади	Тип леса	Состав древостоя	Средний диаметр ствола, см	Средняя высота дерева, м	Полнота		Возраст, лет	Класс бонитета	Запас древесины, м ³ /га
					абсолютная, м ² /га	относительная, усл. ед.			
1	Сосняк черничный влажный	9С1Б	19,2	17,6	26,9	0,79	90	IV	234
2	Сосняк черничный	9С1Б	21,6	17,8	28,2	0,83	88	IV	246
4	Сосняк черничный	9С1Ос+Б	20,4	17,3	27,8	0,87	86	IV	287
3	Сосняк кустарничково-сфагновый	10С ед. Б	13,1	10,5	16	0,69	89	V	87
5	Сосняк кустарничково-сфагновый	10С	11,1	10,0	19,3	0,88	66	V	104
8	Сосняк осоково-хвощево-сфагновый осушенный у канала	9С1Б ед .Ос.	16,7	15,9	20,1	0,64	73	IV	159
9	Сосняк осоково-хвощево-сфагновый осушенный в межканальном пространстве	10С ед.Б	13,5	13,9	20,7	0,71	69	IV	144

сосняках черничных влажных, сосняках кустарничково-сфагновых и в сосняках осоково-хвощево-сфагновых осушенных. Возрастной диапазон древостоев составляет 70...90 лет, что не сильно отличает их друг от друга и позволяет сравнивать. Подобрать идентичные древостои в реальных условиях весьма проблематично, скорее всего, невозможно (табл. 1).

Пробные площади расположены в Приморском районе Архангельской области на уровне 64°33' северной широты. Условия летнего периода в тайге дифференцированы зонально, а изотермы имеют особенность к субширотному расположению.

Исследован живой напочвенный покров, характерный для пробных площадей (табл. 2).

В табл. 2 видны виды-доминанты, которые послужили основанием для названий типа леса наряду с древесным ярусом. В черничных типах леса в травяно-кустарничковом ярусе доминантами, безусловно, являются черника, брусника, а в мохово-лишайниковом ярусе — зеленые мхи. Проективное покрытие черники составляет 66...70 %. В сосняках кустарничково-сфагновых осушенных видовой состав травяно-кустарничкового яруса представлен черникой, голубикой, багульников, кассандрой, карликовой березкой и другими видами, которые в совокупности составляют около 40 % состава, а мохово-лишайникового яруса — сфагновыми мхами в количестве 70...77 % состава. Отличаются по составу осушенные сосняки. В результате осушения уменьшилось проективное покрытие сфагновых мхов, однако увеличилось покрытие зеленых мхов, а в травяно-кустарничковом ярусе появилась брусника (отчасти в названии типа леса отдали приоритет первоначальному состоянию).

Закладка пробных площадей осуществлялась в соответствии с общепринятыми методиками и рекомендациями [28–34]. Кроме того, использовался справочник [35]. Был выполнен комплекс работ по лесоводственному, таксационному и геоботаническому описанию пробных площадей. Тип леса определяли с помощью лесотипологической схемы, применяющейся в лесоустройстве и основанной на эдафитоценологической классификации В.Н. Сукачева [29].

Степень различий или сходства растительных сообществ либо выборок с точки зрения их видового состава можно оценить относительно объективно с помощью индексов Жаккара (I_J) и Серенсена — Чекановского (I_S), применяющихся при изучении живого напочвенного покрова. Эти индексы равны 1 (или 100 % в случае выражения их через проценты) в случае полного совпадения видов сообществ и равны 0, если выборки различны и не включают в себя общих видов, т. е.

$$I_J = \frac{c}{(a+b-c)}100;$$

$$I_S = \frac{2c}{(a+b)}100,$$

где a — число видов в первом описании;

b — число видов во втором описании;

c — число видов, общих для двух сравниваемых сообществ.

Чем меньше общих видов в сообществах, тем выше бета-разнообразие.

Освещенность была измерена портативным люксметром «ТКА-Люкс», на высоте 1,3 м от поверхности земли и на уровне напочвенного покрова (травяно-кустарничкового яруса) — выносным приемником.

Температуру и влажность воздуха, а также скорость ветра измеряли прибором контроля параметров воздушной среды метеометра МЭС-200, других метеофакторов — в одно и то же время — в промежутке между 12.00 и 15.00 — синхронно, поскольку была необходимость выявления связи между факторами и их влияния на растительность нижних ярусов.

Полученные данные обработаны с помощью пакета программ Microsoft Office.

Результаты и обсуждение

Выделение типа леса по методике В.Н. Сукачева, как правило, не вызывает затруднений, особенно в случае, когда есть подробное описание верхних и нижних ярусов биогеоценоза и известны виды доминанты. При оценке воздействия того или иного типа леса на климатические факторы требуются более объективные критерии по имеющимся фитоценозам, поэтому был выполнен анализ с индексами Жаккара и Серенсена. Наиболее близкими выделенными типами леса стали сосняк черничный и сосняк черничный влажный. По расчетам получены следующие данные: $I_J = 43$ %; $I_S = 60$ %, т. е. согласно первому общих видов менее 50 %, а по второму — чуть более 50 %. Поскольку различаются наборы видов и степень увлажнения участков, выделение этих типов леса оправдано.

Сравнение сосняка черничного влажного с сосняком кустарничково-сфагновым показало, что индексы здесь, соответственно, равны $I_J = 42$ %; $I_S = 59$ %, т. е. ценозы также различаются. Если сравнить сосняки осоково-хвощево-сфагновые осушенные на разном удалении от осушительного канала, получим следующие индексы: $I_J = 67$ %; $I_S = 80$ %, что однозначно свидетельствует об одном типе леса.

В целях определения зависимости микроклимата под пологом древостоя от типа леса провели

Т а б л и ц а 2

Среднее проективное покрытие (%) растений напочвенного покрова по пробным площадям

Average projective cover (%) of ground vegetation in sample plots

№	Вид	Проективное покрытие, %						
		Номер пробной площади						
		1	2	3	4	5	8	9
Травяно-кустарничковый ярус								
1	Голубика <i>Vaccinium uliginosum</i> L.	–	0,1	4,4	0,1	5	–	–
2	Брусника <i>Vaccinium vitis-idaea</i> L.	3,7	9,7	0,8	10	1	11,5	13,0
3	Черника <i>Vaccinium myrtillus</i> L.	66,4	68,0	22,5	70	2	1,0	0,1
4	Майник двулистный <i>Maianthemum bifolium</i> (L.) F.W. Schmidt	–	–	–	2	–	–	–
5	Хвощ лесной <i>Equisetum sylvaticum</i> L.	12,6	–	–	–	–	12,3	14,3
6	Иван-чай узколистный <i>Chamaenerion angustifolium</i> Hill	–	–	–	1	–	–	–
7	Седмичник европейский <i>Trientalis eugoraea</i> L.	–	–	–	1	–	–	–
8	Ожика волосистая <i>Luzula pilosa</i> (L.) Willd.	0,1	–	–	1	–	–	–
9	Водяника черная <i>Empetrum nigrum</i> L.	–	–	4,4	–	2	–	0,5
10	Осока <i>Carex</i> L.	4,8	–	0,1	–	–	6,7	5,2
11	Морошка обыкновенная <i>Rubus chamaemorus</i> L.	0,3	–	11,7	–	10	0,1	–
12	Горошек мышиный <i>Vicia cracca</i> L.	–	–	–	–	–	0,1	–
13	Багульник <i>Ledum palustre</i> L.	0,5	0,1	5,2	0,1	15	–	1,4
14	Марьянник лесной <i>Melampyrum silvaticum</i> L.	–	2,6	–	2	–	–	–
15	Подбел обыкновенный <i>Andromeda polifolia</i> L.	–	–	0,6	–	3	–	–
16	Пушица влагалищная <i>Eriophorum vaginatum</i> L.	–	–	4,8	–	6	–	–
17	Клюква болотная <i>Oxycoccus palustris</i> Hill.	–	–	0,2	–	4	–	–
18	Вереск обыкновенный <i>Calluna vulgaris</i> Salisd.	–	–	0,2	–	4	–	–
19	Береза карликовая <i>Betula nana</i> L.	–	–	3,0	–	20	–	–
20	Касандра болотная <i>Chamaedaphne calyculata</i> (L.) Moench	–	–	0,4	–	5	–	–
Мохово-лишайниковый ярус								
21	Плеуроциум Шребери <i>Pleurozium schreberi</i> Willd.ex Brid.	5,5	14,0	1,0	26	5	6,8	20,0
22	Кукушкин лен обыкновенный <i>Polytrichum commune</i> Hedw.	20,5	1,8	3,2	1	5	3,6	0,1
23	Дикранум метловидный <i>Dicranum scoparium</i> Hedw.	–	–	–	5	–	6,4	6,1
24	Сфагнум <i>Sphagnum</i> L.	19,0	–	77,0	–	70	2,0	2,5
25	Гилокониум блестящий <i>Hylocomium splendens</i> (Hedw.) Schimp.	0,9	5,0	–	25	–	–	–
26	Ритидиладельфус трехгранный <i>Rhytidiadelphus triquetrus</i> (Hedw.) Warnst.	–	1,5	–	5	–	–	–

Влияние типов леса — сосняка черничного и сосняка кустарничково-сфагнового на освещенность под пологом леса

Influence of forest types as bilberry pine and sphagnum shrubby pine on illumination under the forest canopy

Источник вариации	Сумма квадратов отклонений	Число степеней свободы	Дисперсия	Критерий Фишера F	Значение критерия Фишера, критическое для уровня значимости 0,05
Межгрупповая	1 875 000	1	1875000	19,17	4,19
Внутригрупповая	2 738 667	28	97809		
Итого	4 613 667	29	—		

дисперсионный анализ по всем метеофакторам и пробным площадям. Например, влияние типа леса на освещенность под пологом в сосняке черничном и кустарничково-сфагновом в полуденные часы однозначно четко проявляется (табл. 3).

Критерий Фишера расчетный значительно выше табличного значения для уровня значимости 0,05 (см. табл. 3).

В дальнейшем такая детализация результатов дисперсионного анализа приводиться не будет, будет приведен только рассчитанный критерий Фишера и его критическое значение для уровня значимости 0,05.

Критерий Фишера расчетный и для освещенности, и для температуры воздуха, и для скорости ветра всегда выше критического значения при уровне значимости 0,05. В то же время ни один из изученных типов леса не влияет на влажность воздуха (рис. 1).

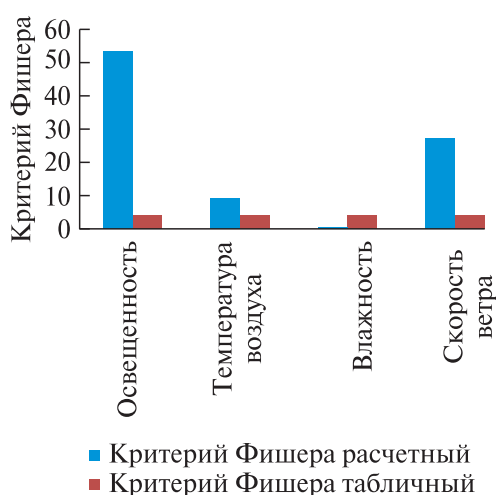


Рис. 1. Критерий Фишера для разных метеофакторов при сравнении под пологом сосняка черничного и сосняка кустарничково-сфагнового

Fig. 1. Fisher's criterion for different meteorological factors when comparing under canopy of blueberry pine and sphagnum shrub pine forests

Освещенность под пологом сосняка кустарничково-сфагнового выше и составляет $5500 \pm 143,73$ лк, а в сосняке черничном $4357 \pm 60,87$ лк, температура воздуха, наоборот, выше в сосняке черничном и ниже в сосняке кустарничково-сфагновом и соответственно равна $19,56 \pm 0,34$ и $18,51 \pm 0,09$ °С. Ветер под пологом сильнее в сосняке кустарничково-сфагновом и составляет $0,48 \pm 0,03$ м/с, в сосняке черничном — $0,30 \pm 0,03$ м/с. Разница есть, но в то же время очевидно, что в обоих типах леса ветер крайне слабый. Влажность в сосняке черничном и сосняке кустарничково-сфагновом составляет $70,57 \pm 4,50$ % и $70,85 \pm 0,86$ % соответственно.

Если же сравнивать два близких между собой типы леса сосняк черничный влажный и сосняк черничный, то можно заключить, что тип леса не влияет на метеофакторы под пологом леса, за исключением влажности воздуха (рис. 2). В сосняке черничном влажном содержание влаги в воздухе составляет $75,14 \pm 0,38$ %, а в сосняке черничном — $70,57 \pm 1,20$ %. По-видимому, более влажная почва при прочих равных условиях в сосняке черничном влажном способствует повышенной влажности воздуха. Однако разница в 5 % тем не менее близка к точности измерения.

Если сравнить метеофакторы под пологом в разных типах леса с теми же показателями на открытом месте, то освещенность под пологом леса в черничных типах леса составляет всего 21...22 % освещенности вне леса, а в сосняке кустарничково-сфагновом — 27 %, что не сильно отличается от таковой в сосняках черничных (табл. 4).

Температура воздуха на высоте 1,3 м от поверхности земли под пологом сосняков очень близка к таковой на открытом месте и лишь на несколько процентов ниже. Влажность воздуха в сосняке выше и составляет 124...132 % по сравнению с открытым местом, т. е. воздух здесь всегда влажный, по-видимому, вследствие невысокой скорости ветра под пологом, нежели на открытом

месте. Таким образом, под пологом леса создается своеобразный микроклимат, отличающийся от микроклимата открытых пространств.

Из табл. 4 видно, что большая часть света, падающего на древостои, задерживается их пологом. Так как густота всех древостоев известна, то можно рассчитать, сколько света задерживает одно дерево: от 12 до 21 лк (в середине июля). Зависимость количества задерживаемого света от густоты древостоя близка к функциональной (рис. 3). Осенью (в октябре) наблюдалась подобная зависимость, с той лишь разницей, что количество света, задержанного одним деревом, уменьшилось.

Сравнение освещенности под пологом леса летом и осенью представляет определенный интерес, особенно в одних и тех же условиях и в одно и то же время суток. Осенью полог древостоев задерживает света меньше, чем в середине лета: если летом он задерживает 73...79 % падающего света, то осенью 57...72 % (табл. 5), что происходит, вероятно, по двум причинам — вследствие отмирания части ассимиляционного аппарата и изменения угла падения солнечных лучей в результате вращения Земли вокруг Солнца.

В сосняке осоково-хвощево-сфагновом осушенном на микроклимат повлиял осушительный канал: заметно увеличились параметры деревьев (высота и диаметр ствола), уменьшилась полнота (пробная площадь № 8) (см. табл. 1) по сравнению с межканальным пространством (пробная площадь № 9). По данным на 19.09.2023 г., освещенность под пологом вблизи осушительного канала была почти в 2 раза выше, чем в межканальном пространстве — соответственно 3300 и 1873 лк. На температуру и влажность воздуха положение по отношению к осушителю не повлияло, а скорость ветра вблизи канала была выше и составила 0,53 м/с против 0,37 м/с в межканальном пространстве.

Немаловажное значение имеют экологические факторы на уровне травяно-кустарничкового яруса, влияющие на видовой состав растений напочвенного покрова, поскольку именно здесь происходит первоначальное развитие всходов древесных пород и мелкого подроста. Анализ метеофакторов на высоте травяно-кустарничкового яруса по сравнению с метеофакторами на высоте 1,3 м от поверхности земли и в различные даты вегетационного периода показал, что фактически не изменяется влажность воздуха. Во все даты измерений (с 08.07.2023 г. по 08.10.2023 г.) в разных типах леса она изменялась незначительно — в пределах 66...75 %. При сравнении ее на разных высотах от поверхности земли — от высоты травяно-кустарничкового яруса до 1,3 м от поверхности земли — влажность воздуха отличалась

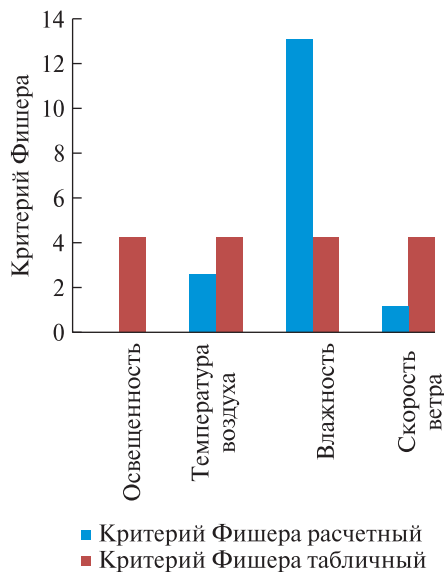


Рис. 2. Критерий Фишера для разных метеофакторов при сравнении под пологом сосняка черничного влажного и сосняка черничного

Fig. 2. Fisher's criterion for different meteorological factors when comparing under the canopy of bilberry pine wet and bilberry pine forests

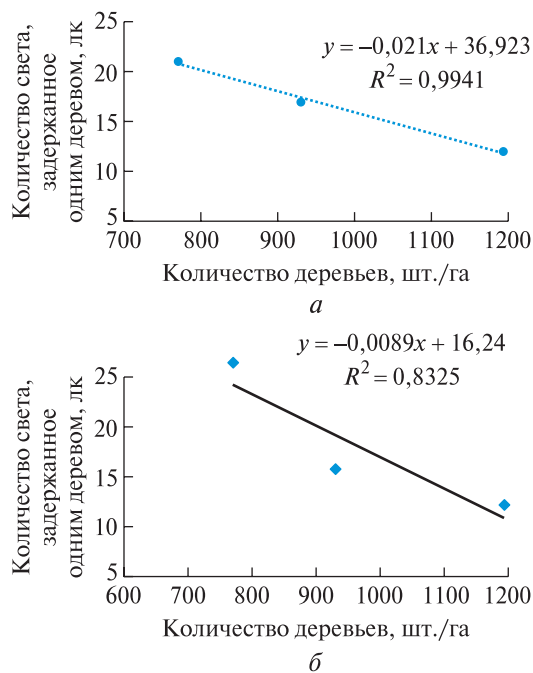


Рис. 3. Зависимость количества света, задержанного одним деревом, от густоты древостоя: а — 13.07.2023 г.; б — 08.10.2023 г.

Fig. 3. Dependence of the amount of light delayed by one tree on stand density: а — 13.07.2023; б — 08.10.2023

не более чем на 1 %, в некоторых случаях была одинаковой, т. е. находилась в пределах точности измерения прибора.

Другие факторы, в частности скорость ветра, по мере снижения высоты измерения с высоты

Т а б л и ц а 4

Метеофакторы под пологом в разных типах леса
Meteorological factors under the canopy in different forest types

Метеофактор	Открытое место	Сосняк черничный влажный	Сосняк черничный	Сосняк кустарничково-сфагновый
Освещенность, лк	20300 ± 37	4414 ± 314 (22)	4357 ± 61 (21)	5500 ± 144 (27)
Температура воздуха, °С	20,2 ± 0,24	19,0 ± 0,04 (94)	19,5 ± 0,34 (97)	18,5 ± 0,09 (92)
Влажность воздуха, %	57 ± 03	75 ± 0,4 (132)	70,6 ± 1,2 (124)	70,9 ± 0,2 (124)
Скорость ветра, м/с	0,63 ± 0,06	0,30 ± 0,02 (48)	0,29 ± 0,03 (46)	0,48 ± 0,03 (76)

Примечание. В скобках указан процент (%) от открытого места.

Т а б л и ц а 5

Свет, задержанный пологом леса
Light delayed by the forest canopy

Номер пробной площади	Тип леса	Густота древостоя, шт./га	Освещенность под пологом леса, лк	Задержанная пологом освещенность		Свет, задержанный одним деревом, лк
				лк	%	
13.07.2023 г.						
1	Сосняк черничный влажный	930	4792	15866	78	17
2	Сосняк черничный	770	4357	15943	79	21
3	Сосняк кустарничково-сфагновый	1194	5500	14800	73	12
08.10.2023 г.						
1	Сосняк черничный влажный	930	5323	6451	57	7
2	Сосняк черничный	770	3091	8073	72	10
3	Сосняк кустарничково-сфагновый	1194	3640	7573	67	6

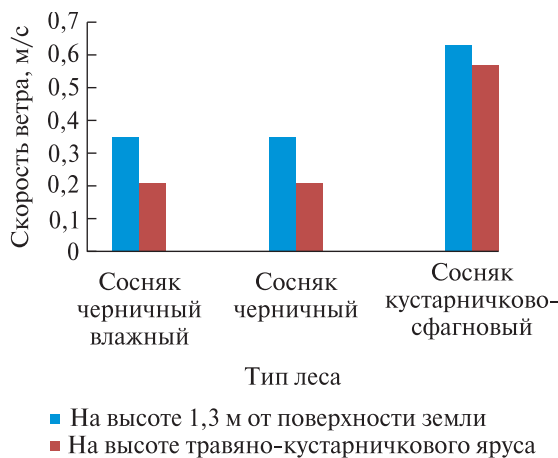


Рис. 4. Скорость ветра на разной высоте под пологом леса
Fig. 4. Wind speed at different heights under the forest canopy

1,3 м от поверхности земли к напочвенному покрову претерпевали заметные изменения. Измерения были проведены в сосняках черничных влажных, сосняках черничных, сосняках брусничных, сосняках кустарничково-сфагновых, сосняках осоково-хвощево-сфагновых осушенных. Везде скорость ветра снижалась к высоте травяно-кустарничкового яруса на 10...40 % (рис. 4), за исключением единственного случая в сосняке

брусничном, когда ветра практически не было, т. е. скорость ветра составляла 0,03 и 0,05 м/с, что находится в пределах точности измерения прибора. В среднем скорость ветра под пологом леса на высоте 1,3 м от поверхности земли составила 0,41 м/с, на высоте травяно-кустарничкового яруса 0,26 м/с.

Подобным образом снижалась освещенность с высоты 1,3 м от поверхности земли к высоте травяно-кустарничкового яруса. В среднем освещенность под пологом леса на высоте 1,3 м от поверхности земли в разные даты измерения изменялась от 1683 лк до 5323 лк, в среднем составила 3778 лк, на высоте напочвенного покрова — от 1500 до 3910 лк, в среднем — 2880 лк.

Практически однозначные выводы можно сделать по температуре воздуха. На уровне напочвенного покрова температура воздуха всегда выше на протяжении вегетационного периода и лишь в его конце (по нашим данным, на 08.10.2023 г.) температура равна (рис. 5). На первый взгляд, различия не особенно велики и находятся в пределах от десятых долей градуса до 1,3 градуса, однако с учетом эффекта накопления суммы эффективных температур для прохождения разных жизненных циклов эти различия могут иметь важное значение.

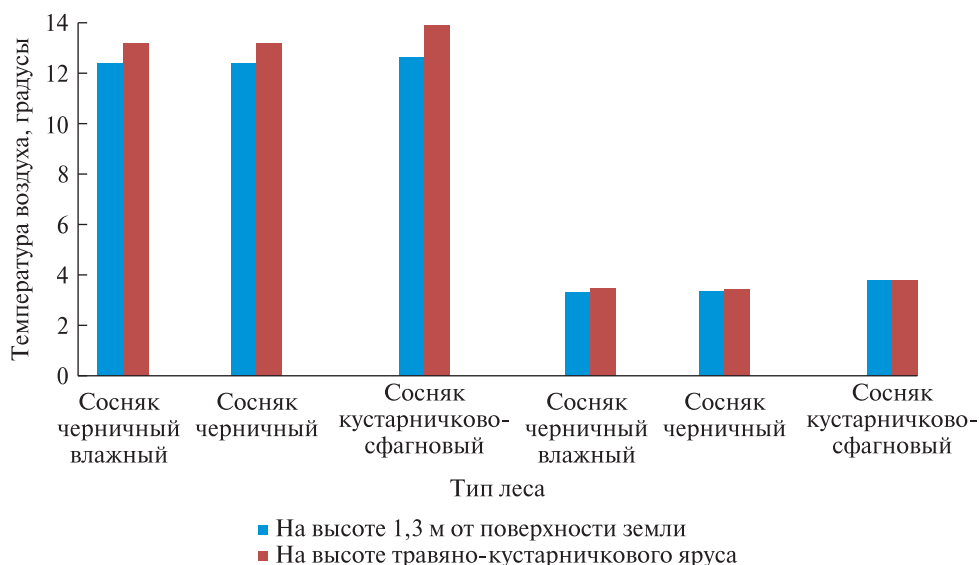


Рис. 5. Температура воздуха на разной высоте под пологом сосняков (первые три столбика слева на 08.07.2023 г. и остальные три на 08.10.2023 г.)

Fig. 5. Air temperature at different heights under the pine forest canopy (first three bars on the left dated 08.07.2023 and the other three dated 08.10.2023)

Выводы

1. Тип леса влияет на параметры метеофакторов под пологом леса: на освещенность, температуру воздуха и скорость ветра. Освещенность и ветер выше в сосняке кустарничково-сфагновом, а температура воздуха выше в сосняке черничном. Влажность воздуха одинакова. При сравнении близких типов леса сосняков черничных и черничных влажных метеофакторы близки (равны), за исключением влажности воздуха — она выше в сосняке черничном влажном.

2. Метеофакторы под пологом сосняков разных типов леса существенно отличаются от показателей на открытом месте. Освещенность меньше и составляет 21...22 % относительно открытого места, скорость ветра — 46...76 %; температура воздуха — 92...97 %; влажность воздуха выше и составляет 124...132 %.

3. Густота древостоев снижает освещенность, в частности, одно дерево задерживает 12...21 лк.

4. Параметры метеофакторов отличаются на высоте 1,3 м от поверхности земли и на уровне травяно-кустарничкового яруса. Скорость ветра к уровню напочвенного покрова снижается на 10...40 %, освещенность — на 24 %, температура воздуха несколько повышается — до 1,3 °С.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова УрО РАН (Номер государственной регистрации — 122011400384-2).

Список литературы

- [1] Морозов Г.Ф. Учение о лесе. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1949. 456 с.
- [2] Ткаченко М.Е. Общее лесоводство. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1955. 600 с.
- [3] Мелехов И.С. Лесоведение. М.: Лесная пром-сть, 1980. 408 с.
- [4] Бех И.А., Калинин А.М., Таран И.В. Лес и жизнь. Кемерово: Кн. изд-во, 1986. 157 с.
- [5] Косарев В.П., Андриященко Т.Т. Лесная метеорология с основами климатологии / под ред. Б.В. Бабилова. СПб.: Лань, 2009. 287 с.
- [6] Банщикова Е.А., Буторова О.Ф. Реакция кустарничковых видов растений монгольской флоры на воздействие климатических факторов Восточного Забайкалья // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса, 2019. 3(55). С. 174–184. DOI 10/32786/2071-9485-2019-0-22
- [7] De Frenne P., Lenoir J., Luoto M., Scheffers B.R., Zellweger F., Aalto J., Ashcroft M.B., Christiansen D.M., Decocq G., De Pauw K., Govaert S., Greiser C., Gril E., Hampe A., Jucker T., Klimes D.H., Koelemeijer I.A., Lembrechts J.J., Marrec R., Meeussen C., Ogée J., Tyystjärvi V., Vangansbeke P., Hylander K. Forest microclimates and climate change: Importance, drivers and future research agenda // Glob Chang Biol, 2021, no. 27(11), pp. 2279–2297.
- [8] De Pauw K., Depauw L., Calders K., Caluwaerts S., Cousins S.A.O., De Lombaerde E., De Frenne P. Urban forest microclimates across temperate Europe are shaped by deep edge effects and forest structure // Agricultural and Forest Meteorology, 2023, v. 341, p. 109632.
- [9] Haesen S., Lembrechts J.J., De Frenne P., Lenoir J., Aalto J., Ashcroft M.B., Kopecký M., Luoto M., Maclean I., Nijs I., Niittynen P., van den Hoogen J., Arriga N., Brūna J., Buchmann N., Čiliak M., Collalti A., De Lombaerde E., Descombes P., Gharun M., Goded I., Govaert S., Greiser C., Grelle A., Gruening C., Hederová L., Hylander K., Kreyling J., Kruijt B., Macek M., Máliš F., Man M., Manca G., Matula R., Meeussen C., Merinero S., Miner-

- bi S., Montagnani L., Muffler L., Ogaya R., Penuelas J., Plichta R., Portillo-Estrada M., Schmeddes J., Shekhar A., Spicher F., Ujházyová M., Vangansbeke P., Weigel R., Wild J., Zellweger F., Van Meerbeek K. ForestTemp — Sub-canopy microclimate temperatures of European forests // *Glob Chang Biol.*, 2022, v. 28(23), pp. 7157–7158.
- [10] Launiainen S. Canopy processes, fluxes and microclimate in a pine forest // *Report Series in Aerosol Science*, 2011, v. 117, 55 p.
- [11] Pradeep S., Gcs N. Microclimate Variability Under Forest Canopies Along an Altitudinal Gradient in Western Himalaya // *Environmental analysis and Ecology studies*, 2024, no. 11(3), pp. 1286–1292.
DOI:10.31031/EAES.2023.11.000765
- [12] Битюков Н.А., Шагаров Л.М. Температура и влажность воздуха под пологом буковых лесов бассейна реки Мзымта // *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки*, 2013. № 5 (177). С. 65–67.
- [13] Чертовский В.Г. Еловые леса европейской части СССР. М.: Лесная пром-сть, 1978. 176 с.
- [14] Чибисов Г.А., Нефедова А.И. Рубки ухода и фитоклимат. Архангельск: Изд-во СевНИИЛХ, 2007. 265 с.
- [15] Феклистов П.А., Торбик Д.Н. Изменение экологических факторов в связи с рубками ухода в северной тайге. Архангельск: Изд-во САФУ, 2011. 213 с.
- [16] Lukina N., Kuznetsova A., Tikhonova E., Smirnov V., Danilova M., Gornov A., Tebenkova D., Knyazeva S., Bakhmet O., Kryshen A., Shashkov M. Linking forest vegetation and soil carbon stock in northwestern Russia // *Forests*, 2020, t. 11, no. 9, p. 979.
- [17] Kishchenko I.T. Dynamics of the isoenzyme composition of peroxidase and pigments in the needles of the introduced species of *Picea* (L.) Karst. in the taiga zone (Karelia) // *Arctic Environmental Research*, 2019, t. 19, no. 4, pp. 129–138.
- [18] Хлюстов В.К., Наумов В.Д., Каменных Н.Л., Ганихин А.М. Взаимосвязь продуктивности лесных насаждений с возрастом и геоморфологией почв // *Теория и практика современной аграрной науки. Сборник IV нац. (Всерос.) науч. конф. с междунар. участием. Новосибирск: Изд-во Новосибирского государственного аграрного университета*, 2021. С. 429–432.
- [19] Grabovskii V.I., Zamolodchikov D.G. The effect of climate parameters on mean growing stock in Russian forests // *Contemporary Problems of Ecology*. 2019, t. 12, no. 7, pp. 675–681.
- [20] Чудаков А.В. Влияние метеофакторов на формирование древесины ели и сосны в зеленомошных типах леса: дис. ... канд. с.-х. наук, 06.03.02. СПб.: Изд-во СПбГЛТУ, 2020. 199 с.
- [21] Данчева А.В., Залесов С.В., Муканов Б.М. Влияние климатических факторов на радиальный прирост сосны в ленточных борах Прииртышья // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2020. Т. 24. № 2. С. 5–10.
DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-5-10
- [22] Тетюхин С.В. Некоторые закономерности соотношения h/d в сосняках, произрастающих на территории Лисинской части учебно-опытного лесничества Ленинградской области // *Леса России: политика, промышленность, наука, образование. Материалы VI Всерос. науч.-техн. конф.* СПб.: Изд-во СПбГЛТУ, 2021. С. 191–194.
- [23] Галдина Т.Е., Хазова Е.П. Влияние климатогеографических факторов на адаптационную способность сосны обыкновенной // *Лесотехнический журнал*, 2020. Т. 10. № 3 (39). С. 35–42.
DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.3/4
- [24] Панарин И.И. Леса Прибайкалья (типы леса, микроклимат, характеристика лесообразующих пород). М.: Наука, 1979. 263 с.
- [25] Пономарева Т.И. Влияние лесосошения на лесорастительные условия сосняков кустарничково-сфагновых северотаежного района Архангельской области: дис. ... канд. с.-х. наук, 06.03.02. Архангельск, САФУ, 2022, 180 с.
- [26] Рунова Е.М., Савченкова В.А. Влияние вырубок на особенности микроклимата в условиях среднего Приангарья // *Актуальные проблемы лесного комплекса*, 2010. № 26. С. 41–44.
- [27] Соболев А.Н., Феклистов П.А. Изменчивость микроклимата в лесных насаждениях Соловецкого архипелага // *Arctic Environmental Research*, 2017. № 3. С. 245–254
- [28] Анучин Н.П. Лесная таксация. М.: Лесная пром-сть, 1982. 552 с.
- [29] Сукачев В.Н., Дылис Н.В. Программа и методика биогеоэкологических исследований. М.: Наука, 1966. 332 с.
- [30] Третьяков С.В., Коптев С.В., Наквасина Е.Н., Бахтин А.А., Ильинцев А.С., Богданов А.П., Кекишева Ю.Е. Лесная таксация. Ч. 4. Закладка и описание пробных площадей при проведении научных исследований и подготовке выпускных квалификационных работ. Архангельск: Изд-во САФУ, 2023. 119 с.
- [31] Гусев И.И. Таксация древостоя. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2000. 13 с.
- [32] Сукачев В.Н., Зонн С.В. Методические указания к изучению типов леса. М.: АН СССР, 1961. 144 с.
- [33] Усольцев В.А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных с ее приложениями. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2007. 636 с.
- [34] Андреева Е.Н., Баккал И.Ю., Горшков В.В., Лянгузова И.В., Мазная Е.А., Нешатаев В.Ю., Нешатаева В.Ю. Методы изучения лесных сообществ. СПб.: Изд-во НИИХимии, СПбГУ, 2002. 240 с.
- [35] Лесотаксационный справочник для северо-востока европейской части СССР. Архангельск: Госкомитет СССР по лесному хозяйству, 1986. 357 с.

Сведения об авторах

Феклистов Павел Александрович[✉] — д-р с.-х. наук, профессор, ФГБУН «Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук», pfeclistov@yandex.ru

Бруева Жанна Алексеевна — аспирант, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ)

Верховцева Елена Павловна — ассистент кафедры биологии, экологии и биотехнологии, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ)

Болотов Иван Николаевич — д-р биол. наук, член-кор. РАН, ФГБУН «Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук», inepas@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.04.2024.

Одобрено после рецензирования 31.05.2024.

Принята к публикации 22.08.2024.

MICROCLIMATE FEATURES UNDER CANOPY OF NORTH TAIGA PINE FORESTS OF DIFFERENT TYPES

P.A. Feklistov^{1✉}, J.A. Brueva², E.P. Verkhovtseva², I.N. Bolotov¹

¹Federal Research Center for Integrated Arctic Studies named after Academician N.P. Laverov Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 20, Nikolsky av., 163020, Arkhangelsk, Russia

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

pfeclistov@yandex.ru

The studies were conducted in different types of pine plantations in the North taiga region of the Arkhangelsk region, which are pure in composition or with a small admixture of other species. The measurement of meteorological factors was carried out at a height of 1,3 m and at the level of the grass-shrub layer. For this purpose, a luxmeter «ТКА-Lux» was used, and measurements of air temperature, air humidity and wind speed were carried out using a meteorological meter MES-200. The taxational characteristics of the studied pine forests are given. The results of the analysis of variance on the effect of forest type on the meteorological factors under the forest canopy are presented. It has been established that, in general, the type of forest significantly affects almost all indicators of the microclimate. It was revealed that under the canopy of the forest, its climatic regime is composed, which accordingly affects all the lower tiers of vegetation and partly on the stand. The illumination and wind are higher in the shrub-sphagnum pine, and the air temperature is higher in the blueberry pine. The humidity of the air is the same. When comparing similar forest types of blueberry and blueberry moist pine forests, the meteorological factors are close (equal) with the exception of air humidity, it is higher in blueberry moist pine, it is shown that meteorological factors under the canopy of pine forests differ significantly from those in the open area. The strongest influence affects the illumination. It is smaller and makes up 21...22 % of the open area, the wind speed is 46...76 %, the air temperature is 92...97 %, but the humidity is higher and is 124...132 %. One tree in the stand with the existing density retains 12...21 lux of light. It is established that the parameters of meteorological factors change with altitude. From a height of 1.3 m, the wind speed to the ground cover level decreases by 10...40 %, illumination by 24 %, and the air temperature rises slightly to 1,3 °C.

Keywords: meteorological factors, microclimate, forest type, temperature, illumination, humidity, wind speed

Suggested citation: Feklistov P.A., Brueva Zh.A., Verkhovtseva E.P., Bolotov I.N. *Osobennosti mikroklimata pod pologom severotaezhnykh sosnyakov raznykh tipov lesa* [Microclimate features under canopy of north taiga pine forests of different types]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 5, pp. 30–41.

DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-30-41

References


- [1] Morozov G.F. *Uchenie o lese* [The Science of the Forest]. Moscow–Leningrad: Goslesbumizdat, 1949, 456 p.
- [2] Tkachenko M.E. *Obshchee lesovodstvo* [General Forestry]. Moscow–Leningrad: Goslesbumizdat, 1955, 600 p.
- [3] Melekhov I.S. *Lesovedenie* [Forest Science]. Moscow: Lesnaya Promyshlennost', 1980, 408 p.
- [4] Bekh I.A., Kalinin A.M., Taran I.V. *Les i zhizn'* [Forest and Life]. Kemerovo: Knizhnoe izd-vo [Book Publishing House], 1986, 157 p.
- [5] Kosarev V.P., Andryushchenko T.T. *Lesnaya meteorologiya s osnovami klimatologii* [Forest Meteorology with the Basics of Climatology]. Ed. B.V. Babikov. St. Petersburg: Lan', 2009, 287 p.
- [6] Bانشchikova E.A., Butorova O.F. *Reaktsiya kustarnichkovykh vidov rasteniy mongol'skoy flory na vozdeystvie klimaticheskikh faktorov Vostochnogo Zabaykal'ya* [Response of dwarf shrub plant species of the Mongolian flora to the impact of climatic factors of Eastern Transbaikalia]. *Izvestiya NV AUK*, 2019, no. 3(55), pp. 174–184. DOI 10/32786/2071-9485-2019-0-22

- [7] De Frenne P., Lenoir J., Luoto M., Scheffers B.R., Zellweger F., Aalto J., Ashcroft M.B., Christiansen D.M., Decocq G., De Pauw K., Govaert S., Greiser C., Gril E., Hampe A., Jucker T., Klings D.H., Koelemeijer I.A., Lembrechts J.J., Marrec R., Meeussen C., Ogée J., Tyystjärvi V., Vangansbeke P., Hylander K. Forest microclimates and climate change: Importance, drivers and future research agenda. *Glob Chang Biol*, 2021, no. 27(11), pp. 2279–2297.
- [8] De Pauw K., Depauw L., Calders K., Caluwaerts S., Cousins S.A.O., De Lombaerde E., De Frenne P. Urban forest microclimates across temperate Europe are shaped by deep edge effects and forest structure. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2023, v. 341, p. 109632.
- [9] Haesen S., Lembrechts J.J., De Frenne P., Lenoir J., Aalto J., Ashcroft M.B., Kopecký M., Luoto M., Maclean I., Nijs I., Niittynen P., van den Hoogen J., Arriga N., Brúna J., Buchmann N., Čiliak M., Collalti A., De Lombaerde E., Descombes P., Gharun M., Goded I., Govaert S., Greiser C., Grelle A., Gruening C., Hederová L., Hylander K., Kreyling J., Kruijt B., Macek M., Máliš F., Man M., Manca G., Matula R., Meeussen C., Merinero S., Minerbi S., Montagnani L., Muffler L., Ogaya R., Penuelas J., Plichta R., Portillo-Estrada M., Schmeddes J., Shekhar A., Spicher F., Ujházyová M., Vangansbeke P., Weigel R., Wild J., Zellweger F., Van Meerbeek K. ForestTemp — Sub-canopy microclimate temperatures of European forests. *Glob Chang Biol*, 2022, v. 28(23), pp. 7157–7158.
- [10] Launiainen S. Canopy processes, fluxes and microclimate in a pine forest // Report Series in Aerosol Science, 2011, v. 117, 55 p.
- [11] Pradeep S., Gcs N. Microclimate Variability Under Forest Canopies Along an Altitudinal Gradient in Western Himalaya // Environmental analysis and Ecology studies, 2024, no. 11(3), pp. 1286–1292. DOI:10.31031/EAES.2023.11.000765
- [12] Bitjukov N.A., Shagarov L.M. *Temperatura i vlazhnost' vozdukhha pod pologom bukovykh lesov basseyna reki Mzymta* [Air temperature and humidity under the canopy of beech forests in the Mzymta River basin]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Estestvennye nauki* [News of universities. North Caucasian region. Series: Natural sciences], 2013, no. 5 (177), pp. 65–67.
- [13] Chertovskiy V.G. *Elovye lesa evropeyskoy chasti SSSR* [Spruce forests of the european part of the USSR]. Moscow: Lesnaya Promyshlennost', 1978, 176 p.
- [14] Chibisov G.A., Nefedova A.I. *Rubki ukhoda i fitoklimat* [Thinnings and phytoclimate]. Arkhangelsk: SevNILH, 2007, 265 p.
- [15] Feklistov P.A., Torbik D.N. *Izmenenie ekologicheskikh faktorov v svyazi s rubkami ukhoda v severnoy tayge* [Changes in environmental factors due to thinnings in the northern taiga]. Arkhangelsk: NArFU, 2011, 213 p.
- [16] Lukina N., Kuznetsova A., Tikhonova E., Smirnov V., Danilova M., Gornov A., Tebenkova D., Knyazeva S., Bakhmet O., Kryshen A., Shashkov M. Linking forest vegetation and soil carbon stock in northwestern Russia. *Forests*, 2020, t. 11, no. 9, p. 979.
- [17] Kishchenko I.T. Dynamics of the isoenzyme composition of peroxidase and pigments in the needles of the introduced species of *Picea* (L.) Karst. in the taiga zone (Karelia). *Arctic Environmental Research*, 2019, t. 19, no. 4, pp. 129–138.
- [18] Khlyustov V.K., Naumov V.D., Kamennykh N.L., Ganikhin A.M. *Vzaimosvyaz' produktivnosti lesnykh nasazhdeniy s vozrastom i geomorfologiyey pochv* [Relationship between forest productivity and soil age and geomorphology]. *Teoriya i praktika sovremennoy agrarnoy nauki. Sbornik IV natsional'noy (Vserossiyskoy) nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Theory and practice of modern agricultural science. Proceedings of the IV national (All-Russian) scientific conference with international participation]. Novosibirsk: Novosibirsk State Agrarian University, 2021, pp. 429–432.
- [19] Grabovskii V.I., Zamolodchikov D.G. The effect of climate parameters on mean growing stock in Russian forests. *Contemporary Problems of Ecology*. 2019, t. 12, no. 7, pp. 675–681.
- [20] Chudakov A.V. *Vliyaniye meteofaktorov na formirovaniye drevesyey eli i sosny v zelenomoshnykh tipakh lesa* [The influence of meteorological factors on the formation of spruce and pine wood in green moss forest types]. Dis. Cand. Sci. (Agric.), 06.03.02. St. Petersburg, SPbGLTU, 2020, 199 p.
- [21] Dancheva A.V., Zalesov S.V., Mukanov B.M. *Vliyaniye klimaticheskikh faktorov na radial'nyy prirost sosny v lentochnykh borakh Priirtysh'ya* [Climatic factors influence on radial pine growth in ribbon pine forests in the Irtysh land]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 2, pp. 5–10. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-5-10
- [22] Tetyukhin S.V. *Nekotorye zakonomernosti sootnosheniya h/d v sosnyakakh, proizrastayushchikh na territorii Lisinskoy chasti uchebno-opyt'nogo lesnichestva Leningradskoy oblasti* [Some patterns of the h/d ratio in pine forests growing on the territory of the Lisinsky part of the educational and experimental forestry of the Leningrad region]. *Lesnaya Rossiya: politika, promyshlennost', nauka, obrazovaniye. Materialy VI Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Forests of Russia: policy, industry, science, education. Proceedings of the VI All-Russian scientific and technical conference]. St. Petersburg: SPbGLTU, 2021, pp. 191–194.
- [23] Galdina T.E., Khazova E.P. *Vliyaniye klimatogeograficheskikh faktorov na adaptatsionnuyu sposobnost' sosny obyknovennoy* [Influence of climatic and geographic factors on the adaptive capacity of Scots pine]. *Forestry journal*, 2020, v. 10, no. 3 (39), pp. 35–42.
- [24] Panarin I.I. *Lesnaya Pribaykal'ya (tipy lesa, mikroklimat, kharakteristika lesoobrazuyushchikh porod)* [Forests of the Baikal region (Forest types, microclimate, characteristics of forest-forming species)]. Moscow: Nauka, 1979, 263 p.
- [25] Ponomareva T.I. *Vliyaniye lesoosusheniya na lesorastitel'nye usloviya sosnyakov kustarnichkovo-sfagnovykh severotaezhnogo rayona Arkhangel'skoy oblasti* [Effect of forest drainage on forest growth conditions of dwarf shrub-sphagnum pine forests in the northern taiga region of the Arkhangelsk region]. Dis. Cand. Sci. [Agric.] 06.03.02. Arkhangelsk, NArFU, 2022, 180 p.
- [26] Runova E.M., Savchenkova V.A. *Vliyaniye vyrubok na osobennosti mikroklimata v usloviyakh srednego Priangar'ya* [Effect of felling on the features of the microclimate in the conditions of the middle Angara region]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex], 2010, no. 26, pp. 41–44.
- [27] Sobolev A.N., Feklistov P.A. *Izmenchivost' mikroklimata v lesnykh nasazhdeniyakh Solovetskogo arhipelaga* [Microclimate variability in forest stands of the Solovetsky Archipelago]. *Arctic Environmental Research* [Arctic Environmental Research], 2017, no. 3, pp. 245–254.
- [28] Anuchin N.P. *Lesnaya taksatsiya* [Forest taxation]. Moscow: Lesnaya Promyshlennost', 1982, 552 p.
- [29] Sukachev V.N., Dylis N.V. *Programma i metodika biogeotsenologicheskikh issledovaniy* [Program and methodology of biogeocenological studies]. Moscow: Nauka, 1966, 332 p.

- [30] Tret'yakov S.V., Koptev S.V., Nakvasina E.N., Bakhtin A.A., Il'intsev A.S., Bogdanov A.P., Kekisheva Yu.E. *Lesnaya taktsiya. Ch. 4. Zakladka i opisaniye probnykh ploshchadey pri provedenii nauchnykh issledovaniy i podgotovke vypusknykh kvalifikatsionnykh rabot* [Forest taxation. Part 4. Laying out and description of sample plots during scientific research and preparation of final qualifying works]. Arkhangelsk: NArFU, 2023, 119 p.
- [31] Gusev I.I. *Taktsiya drevostoya* [Taxation of forest stand]. Arkhangelsk: Izd-vo AGTU [Publishing house of ASTU], 2000, p. 13.
- [32] Sukachev V.N., Zonn S.V. *Metodicheskie ukazaniya k izucheniyu tipov lesa* [Methodical instructions for the study of forest types]. Moscow: AN SSSR [USSR Academy of Sciences], 1961, 144 p.
- [33] Usol'tsev V.A. *Biologicheskaya produktivnost' lesov Severnoy Evrazii: metody, baza dannykh s ee prilozheniyami* [Biological productivity of forests of Northern Eurasia: methods, database with its applications]. Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2007, 636 p.
- [34] Andreeva E.N., Bakkal I.Yu., Gorshkov V.V., Lyanguzova I.V., Maznaya E.A., Neshataev V.Yu., Neshataeva V.Yu. *Metody izucheniya lesnykh soobshchestv* [Methods for studying forest communities]. St. Petersburg: Publishing House of the Research Institute of Chemistry, St. Petersburg State University, 2002, 240 p.
- [35] *Lesotaktsionnyy spravochnik dlya severo-vostoka Evropeyskoy chasti SSSR* [Forest Inventory Handbook for the North-East of the European Part of the USSR]. Arkhangelsk: USSR State Forestry Committee, 1986, 357 p.

The research was carried out within the framework of the state assignment of the Federal Research Center for Integrated Arctic Studies named after Academician N.P. Laverov of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (state registration no. – 122011400384-2).

Authors' information

Feklistov Pavel Aleksandrovich  — Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Federal Research Center for Integrated Arctic Studies named after Academician N.P. Laverov, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, pfeklistov@yandex.ru

Brueva Zhanna Alekseevna — pg., Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (NArFU)

Verkhovtseva Elena Pavlovna — Assistant of Department of Biology, Ecology and Biotechnology, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (NArFU)

Bolotov Ivan Nikolaevich — Dr. Sci. (Biology), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Federal Research Center for Integrated Arctic Studies named after Academician N.P. Laverov, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, inepras@yandex.ru

Received 10.04.2024.

Approved after review 31.05.2024.

Accepted for publication 22.08.2024.

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

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ШИРИНЫ ГОДИЧНЫХ КОЛЕЦ ДЕРЕВЬЕВ В БЕРЕЗНЯКАХ И ЕЛЬНИКАХ УВИНСКОГО ЛЕСНИЧЕСТВА (УДМУРТСКАЯ РЕСПУБЛИКА)

Д.А. Поздеев[✉], Р.Р. Абсалямов, М.В. Якимов

ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный аграрный университет», Россия, 426069, Удмуртская Республика, г. Ижевск,
ул. Студенческая, д. 11

dap219@mail.ru

Установлена средняя ширина годичного кольца березы в сосняке липовом — 0,6 мм, в ельнике липняковом — 1,1 мм, а также средняя ширина годичного кольца ели в ельнике липняковом — 3,0 мм. Показана изменчивость ширины годичного кольца древесных пород, составившая от 30 до 49 %, при этом закономерности ее варьирования с возрастом не выявлены. Сформированы группы древостоев по возрасту. Выявлено наличие значимых различий в дисперсиях выборок образованных кластеров. Выполнен корреляционный анализ, указавший на наличие связи ширины годичного кольца и возраста древостоя в исследуемых типах леса. Установлено различие ширины годичного кольца березы в разных типах леса в древостоях с одинаковым возрастом. Предложен анализ уравнений простой регрессии с возрастом и диаметром стволов древостоев. Проведен подбор уравнений нелинейных функций, объясняющих указанные зависимости.

Ключевые слова: лесной фонд, ельник, березняк, пробные площади, керны древесины, ширина годичного кольца дерева

Ссылка для цитирования: Поздеев Д.А., Абсалямов Р.Р., Якимов М.В. Сравнительный анализ ширины годичных колец деревьев в березняках и ельниках Увинского лесничества (Удмуртская Республика) // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 5. С. 42–54. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-42-54

Изучение древостоев основных лесобразующих пород имеет большое значение для лесного хозяйства. На территории РФ березовые и еловые древостои распространены повсеместно в лесной и лесостепной зонах, за исключением районов Северо-Восточной Сибири, и немногочисленных пустынных и полупустынных территорий.

Ельники Удмуртской Республики подробно изучены в работе [1]. В частности, в главе «Строение древостоев ели» приведены данные о строении древостоев по диаметрам стволов и фитомассе крон [1].

В работе [2] на основании изучения динамики и состояния еловых насаждений Удмуртской Республики сделан вывод о снижении их площади в период с 2009 по 2015 гг. Значительное сокращение площадей еловых древостоев произошло в районе хвойно-широколиственных лесов — 15 %, в южно-таежном районе оно составило 6 %.

В работе [3] автор пришел к выводу о масштабных деграционных процессах, происходящих в еловых древостоях Удмуртской Республики, наблюдаемых в наиболее продуктивных типах леса. Отмечено их неблагоприятное санитарное состояние в лесном районе хвойно-широколиственных лесов, связанное с жизнедеятельностью вредителя короеда-типографа (*Ips typographus*),

а также его постепенное распространение и в южно-таежном лесном районе [3].

Материалы изучения березняков Удмуртской Республики представлены в работах [4–6]. По этим данным и данным государственного лесного реестра Удмуртии за период с 2007 по 2022 гг. установлены изменения площадей ельников и березняков (табл. 1).

Постепенное снижение площади ельников в указанный период происходило до 2015 г., а затем площади ельников стали резко уменьшаться — с 725,3 до 619,7 тыс. га.

Площади березняков в отличие от ельников увеличились с 604,8 до 690,5 тыс. га. Аналогичные изменения характерны и для запасов древесины березняков и ельников (табл. 2).

Снижение запасов древесины ельников характерно всем группам возраста, а в спелых и перестойных древостоях оно значительное — с 26 до 21 млн м³. В березняках происходит существенное увеличение запасов спелых и перестойных древостоев — с 36 до 41 млн м³.

При изучении прироста объема стволов отдельных деревьев и запаса прироста древостоев важное значение имеет прирост диаметра ствола, который можно определить по радиальному приросту деревьев.

Изучение запаса древесины древостоев и радиального прироста деревьев проведено многими авторами [7–12]. Ширина годичных колец деревьев

подробно рассматривается в рамках преподавания дисциплины «Дендрохронология» [13]. По мнению авторов работы [13], первой отечественной научной работой по дендрохронологии была книга профессора Одесского университета Ф.Н. Шведова «Дерево как летопись засух», изданная в 1892 г. [14].

История развития дендрохронологии в Америке и Европе, на Ближнем Востоке и в Советском Союзе подробно описана также в работе [13].

Одним из центров дендрохронологии в Советском Союзе считалась научная школа, образованная в 1960-х годах в Институте ботаники Академии наук Литовской ССР на базе лаборатории дендрохронологии и дендроклиматологии [13]. В ежегодных научных отчетах этой лаборатории преобладают научные статьи Т.Т. Битвинскаса, Б.А. Колчина [15–17]. Тематика научных статей включала в себя проблемы дендрохронологии, материалы исследований прироста насаждений, особенности применения дендроклиматических методов в лесоустройстве и лесном хозяйстве.

К представителям известной сибирской школы дендрохронологии относятся Е.А. Ваганов и И.А. Терсков, а их работа [18] свидетельствует о развитии микрофотометрических методов изучения строения годичных колец древесных растений в конце 1970-х годов.

Активные исследования в данном направлении ведутся во всем мире и в настоящее время. Так, в статье [19] оценивается реакция радиального роста сосны обыкновенной и ели на климат и рельефа местности в Скалистых горах Альберты.

Работа [20] о влиянии осадков и температуры воздуха на ширину годичных колец деревьев пихты греческой (*Abies cephalonica*) на горе Джиона в материковой Греции подтверждает значимость климатических факторов при формировании радиального прироста ствола пихты греческой.

Снижение радиального прироста ели белой (*Picea glauca*) в центральной части города Нью-Йорка ввиду современных климатических тенденций рассматривается в статье [21]. Ее авторами выявлено, что длительные периоды с летней

Т а б л и ц а 1
Изменения площадей ельников и березняков за период с 2007 по 2022 гг.

Changes in the areas of spruce and birch forests from 2007 to 2022

Год	Лесопокрытая площадь с преобладанием древесной породы			
	Ель		Береза	
	тыс. га	процент относительно общей лесопокрытой площади	тыс. га	процент относительно общей лесопокрытой площади
2007	792,6	41,0	608,2	31,0
2008	787,1	40,6	606,3	31,3
2009	790,7	40,7	604,8	31,2
2010	785,3	40,5	607,5	31,3
2011	772,3	39,9	614,7	31,7
2012	760,4	39,4	616,6	31,9
2013	752,9	39,1	617,7	32,1
2014	747,2	38,9	619,3	32,2
2015	725,3	37,9	627,5	32,8
2016	677,6	35,5	664,9	34,8
2018	672,3	35,2	669,0	35,1
2022	619,7	32,6	690,5	36,4

температурой более +30 °С провоцируют раннее прекращение радиального прироста диаметра ствола независимо от наличия сезонных осадков.

Подобные результаты получены и представлены в работе о фенотипическом и генетическом влиянии стресса, вызванного засухой, на рост вершины, ширину годичного кольца, плотность древесины и биомассу семян ели белой (*Picea glauca*) [22]. Авторы сделали вывод, что с увеличением интенсивности и продолжительности стресса, вызванного засухой, радиальный прирост заметно снижался, а плотность древесины имела тенденцию к увеличению.

В исследовании [23] изучено влияние долгосрочных изменений в составе насаждений и свой-

Т а б л и ц а 2
Запас древесины и средний прирост ельников и березняков в 2018 и 2022 гг.

Wood stock and average growth of spruce and birch forests in 2018 and 2022

Древостой	Год	Запас общий, млн м ³	Запас по группам возраста, млн м ³				Общий средний прирост, млн м ³	Средний возраст, лет
			Молодняки	Средневозрастные	Приспевающие	Спелые и перестойные		
Ельник	2018	112,60	18,16	41,58	26,73	26,13	2,11	50
	2022	103,58	16,89	40,56	24,59	21,54	1,98	49
Березняк	2018	109,94	2,15	47,68	23,86	36,25	2,44	48
	2022	117,54	2,02	48,00	26,47	41,05	2,52	49

ствах почвы на радиальный прирост диаметра ствола клена сахарного (*Acer saccharum* Marsh.) и пихты бальзамической (*Abies balsamea* (L.) Mill.) в лесах на северо-востоке Северной Америки.

Авторы работы [24], изучая радиальный рост сосны стланиковой (*Pinus pumila*) в северной части гор Дасинань на северо-востоке Китая, пришли к выводу, что она на малой высоте в горах более чувствительна к климатическим изменениям (особенно температуры воздуха), чем на средней и большой. Влияние влажности на радиальный прирост кустарника заметно проявляется именно на средних высотах.

Статья [25] посвящена изучению влияния среднемесячной температуры и суммы положительных температур воздуха на радиальный прирост древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях техногенного воздействия на отвалах угольных предприятий Кузбасса.

Дендрохронология — это высокотехнологичная наука, в которой не прекращается поиск новых эффективных методов изучения годичных колец деревьев. Так, в методической части работы [26] рассматривается сравнение различных методов определения ширины годичных колец. Как менее трудоемкий рекомендован метод определения ширины годичных колец по среднему радиусу.

В работе [27] предлагается простой неразрушающий метод оценки годичного прироста объема растущих деревьев, основанный на анализе годичных колец деревьев при выборе двух точек определения прироста для каждого модельного дерева, и простых правилах тригонометрии.

Методы оценки радиального прироста диаметра стволов деревьев также развиваются. В статье [28] приводится оценка дисперсии среднего прироста на основании двойной выборки для стратификации (2SS).

С развитием новых технологий и программного обеспечения появляется качественно новая возможность посмотреть на выявленные ранее зависимости и закономерности, установленные дендрохронологией.

Цель работы

Цель работы — исследование ширины годичных колец еловых и березовых древостоев, формирующих радиальный прирост диаметра ствола и, как следствие, запас прироста древесины.

Материалы и методы

В исследованиях были использованы данные таксационных описаний выделов Ува-Туклинского участкового лесничества Увинского лесничества. Группировка (стратификация) таксационных выделов проводилась по типам леса и возрастным периодам [29, 30]. В результате анализа выделено

38 лесных страт березняков, которые объединены в укрупненные группы [6], в ельниках выделено две укрупненные группы страт (табл. 3).

Расчет объема выборки учетных выделов для каждой страты определяется по формуле [31]

$$N = \frac{S^2 t^2}{(Xg)^2},$$

где S^2 — дисперсия запасов древесины;

t^2 — значение критерия Стьюдента ($t = 1,96$ для вероятности 0,95);

X — среднее значение запаса древесины, м³/га;

g — целевая точность (в долях единицы).

При принятии базовой точности ($g = 10\%$) определения запаса по стратам проведен расчет оптимального количества пробных площадей по стратам (табл. 4).

В березняках выбраны учетные выделы в двух укрупненных группах, представленных наибольшими площадями, — ельнике липняковом и сосняке липовом. В ельниках выбрана группа — ельник липняковый, сосняк липовый. После чего был составлен маршрут для закладки пробных площадей.

Количество и размер пробной площади подбирали в соответствии с требованиями выборочной таксации [32]. Оформление круговых пробных площадей регламентируется ОСТ 56-69-83 «Площади пробные лесоустроительные. Метод закладки» [33].

Величина радиуса круговой пробной площади зависит от относительной полноты и среднего диаметра ствола преобладающего элемента леса [29]. Размещение круговых площадей должно быть равномерным по всему учетному выделу. Для этого прокладываются граничные и внутренние визиры. Центр пробной площади указывается колышком высотой 0,5 м и толщиной 5 см, ограничение площади выполняют мерной лентой.

Перечет деревьев на круговой площади постоянного радиуса ведется по каждой древесной породе, категориям технической годности (качества) и ступеням толщины. По технической годности деревья подразделяются на три категории: деловые, полуделовые, дровяные.

В пределах пробной площади для каждой составляющей породы измеряют высоту растущих деревьев (с помощью высотомера) — по три дерева в трех средних ступенях толщины [33].

Средний диаметр древостоя элемента леса определяют через среднюю площадь сечения стволов, а среднюю высоту — с помощью кривой высот, т. е. графически.

Полекамеральная обработка данных замеров на круговых пробных площадях постоянного радиуса предполагает также определение и других таксационных показателей древостоя элемента леса, яруса и насаждения (относительной пол-

Т а б л и ц а 3

Характеристика укрупненных групп лесных страт березняков и ельников**Characteristics of enlarged groups of birch and spruce forests strata**

Древостой	Название укрупненной группы лесной страты	Площадь укрупненной группы страт, га	Количество страт в укрупненной группе, шт.	Средний состав укрупненной группы	Средний запас древесины березы в группе, м ³ /га
Березняк	Ельник липняковый (C ₂ , C ₃)	4009,7	6	7Б2Е1Ос+Лп	91
	Ельник черничный (C ₂ , C ₃)	807,6	8	7Б2Е1Ос+Лп	75
	Ельник широколиственный (Д ₃)	512,6	6	7Б3Е+С+Ос	66
	Сосняк липовый (C ₂ , C ₃)	2069,4	11	7Б1Е1Лп1С+Ос	54
	Сосняк черничный (В ₃)	271,1	2	7Б2Е1Ос+С+Ос	79
	Ельник кисличный (C ₂ , C ₃)	231,4	5	7Б2Е1Ос+Лп	66
Ельник	Ельник липняковый (C ₂ , C ₃)	95,6	3	7Е2Б1Лп+П	105
	Сосняк липовый (C ₂ , C ₃)	19,5	2	5Е3Лп2Б	103

Т а б л и ц а 4

Оптимальное количество учетных выделов березняков и ельников по стратам**Optimal number of survey plots of birch and spruce forests by strata**

Древостой	Название страты	Площадь страты, га	Средний запас древесины выдела, м ³	Дисперсия запасов древесины, м ³	Коэффициент вариации запаса древесины, %	Оптимальное количество учетных выделов, шт.
Березняк	Ельник липняковый (C ₂ , C ₃)	4009,7	91	413,8	8,5	9
	Сосняк липовый (C ₂ , C ₃)	2069,4	54	237,2	5,7	8
Ельник	Ельник липняковый (C ₂ , C ₃)	95,6	105	230,3	4,3	4
	Сосняк липовый (C ₂ , C ₃)	19,5	103	210,5	4,7	3

ноты, запаса, состава древостоя, разряда высот, класса товарности, класса бонитета) [33].

Согласно методике отбора кернов древесины [34], для дендрохронологического анализа используются круговые поперечные спилы, бруски древесины по радиусу и диаметру, клиновидные выпилены с пней и живых деревьев, буровые керны и высечки. В настоящее время широкое применение нашли буровые керны древесины. Значительным преимуществом кернов древесины является то, что при их отборе живому дереву не наносятся серьезные повреждения и требуется значительно меньше времени и сил по сравнению с взятием других перечисленных выше образцов древесины.

Керны необходимо отбирать на высоте 1,3 м от поверхности земли по произвольно взятому радиусу. Использование для взятия кернов нижней части ствола не запрещается, однако следует иметь в виду, что прирост комлевой части формируется неравномерно и колебания его отражают преимущественно эффекты влияния механической нагрузки на ствол, а не другие параметры окружающей среды.

Сверление совершается в направлении, перпендикулярном продольной оси ствола дерева.

Керны стволов, близких по поперечному сечению к окружности, берутся по одному произвольному направлению. При эллипсовидной форме поперечного сечения ствола взятие кернов может быть строго ориентированным по сторонам света или в произвольном направлении по двум противоположным радиусам. Деревья, имеющие наклон ствола, не используются для взятия кернов древесины.

Допускается просверлить дерево насквозь. При этом полученный керн древесины будет с противоположными радиусами.

Качество отбираемых кернов не менее важно, чем правильность их взятия. Не используют керны, у которых отсутствует начальная часть древесины вместе с корой. В случае если у керна отсутствует только кора, а древесина полностью сохранилась, то керн можно использовать.

Особое внимание необходимо уделять остроте винчиваемой части бурава. Правильно заточенные буравы снижают частоту появления сломанных кернов, что важно, поскольку такие керны не используются. Керны с наличием гнили также использовать запрещено [34].

Отбор кернов древесины березы и ели осуществлялся у модельных деревьев с использо-

Таксационные показатели и ширина годовых колец деревьев в березняках и ельниках

Taxation indices and width of trees annual rings in birch and spruce forests

Древостой	Квартал	Выдел	Состав	Таксационные показатели преобладающего элемента леса и насаждения					Минимальная и максимальная ширина годовичного слоя за 10 лет, мм
				Средний диаметр, см	Средняя высота, м	Средний возраст, лет	Класс бонитета	Полнота	
Березняк	Сосняк липовый								
	21	17	5Б2Е3Ос	22,3	23,0	60	2	0,5	0,5...0,7
	36	2	8Б2Е+Лп	18,8	27,0	90	1	0,5	0,4...0,8
	36	5	8Б2Ос	22,2	23,0	55	1	0,2	0,5...0,7
	36	8	9Б1Е+Лп	15,1	19,0	40	1	0,8	0,6...1,0
	36	12	9Б1Ол	15,7	16,0	30	1	0,5	0,6...1,0
	67	1	4Б3С2Е1Ос	30,5	25,0	90	1	0,5	0,4...0,6
	67	18	4Б2С2Ос1Е	26,3	24,8	55	1	0,4	0,6...0,8
	80	13	6Б2Лп1Е1Ос	29,3	25,0	70	1	0,8	0,8...1,0
	100	2	9Б1Лп+В	32,9	24,2	65	1	0,8	0,4...0,8
	100	7	5Б5Е+Лп	21,6	23,0	60	2	0,2	0,5...0,8
	Ельник липняковый								
	25	13	7Б3Е+Лп	22,7	24,0	60	1	0,7	1,1...1,3
	25	18	5Б3Е2Ос	23,4	23,0	60	2	0,6	0,6...0,9
	80	19	8Б2Е+Лп	21,5	21,5	50	1	0,8	0,8...1,1
	80	20	7Б2Ос1Лп	29,4	26,0	70	1	0,7	1,3...1,5
	100	5	9Б1Лп	26,1	24,0	70	2	0,6	1,3...1,6
132	12	9Б1Е	14,0	15,0	30	2	0,8	0,9...1,2	
Ельник	Ельник липняковый								
	25	15	7ЕЗБ	22,7	24,0	60	1	0,7	1,8...5,8
	25	21	5ЕЗБ2Ос	23,4	23,0	60	2	0,6	0,4...4,0

ванием возрастного бурава (бурав Пресслера) на высоте 1,3 м от поверхности земли. Дополнительно радиальный прирост деревьев ели оценивался по спилам на высоте от 1 до 1,3 м от поверхности земли. Всего было отобрано 96 кернов и взято 12 спилов модельных деревьев ели.

Керны наклеивались на специальную деревянную подложку, а затем их поверхность тщательно зачищалась остро режущим инструментом (канцелярским ножом).

Определение ширины годовых колец за последние 10 лет выполнялось с помощью микроскопа МБС-1, цифровой фотокамеры и измерительной лупы.

Результаты и обсуждение

Сложность идентификации годовых колец у рассеянно-сосудистых лиственных пород заключается в отсутствии четкой границы между ранней и поздней древесиной, однако при до-

статочном увеличении годовые кольца можно идентифицировать. На спилах ели после шлифовки границы годовых колец четко выделяются (табл. 5).

Для выявления среднего значения ширины годовых колец и их изменчивости проведена обработка результатов методом описательной статистики [35–37] (табл. 6).

Средняя величина годовичного кольца березы в сосняке липовом составляет 0,6 мм, а в ельнике липняковом — 1,1 мм.

Средняя ширина годовичного кольца ели в типе леса ельник липняковый составляет 3,0 мм.

Коэффициент изменчивости ширины годовичного кольца березы варьирует в пределах от 30,5 до 42,5 %, причем существенных различий между типами леса не наблюдается. Для древостоев ели коэффициент изменчивости варьирует от 32,0 до 49,3 %. Точность опыта во всех случаях не превышает 8 %, а коэффициент достоверности

Т а б л и ц а 6

Статистические показатели средней ширины годовичного кольца деревьев березы и ели

Statistical indices of average annual ring width of birch and spruce trees

Древостой	Квартал	Выдел	Средняя ширина годовичного кольца, мм	Коэффициент изменчивости %	Точность опыта, %	Коэффициент достоверности	Коэффициент асимметрии	Коэффициент эксцесса
Березняк	Сосняк липовый							
	21	17	0,62	31,0	5,0	31,0	-0,07	2,30
	36	2	0,51	34,2	6,1	51,0	-0,42	1,03
	36	5	0,57	33,8	5,2	57,0	0,33	-0,55
	36	8	0,85	39,0	7,2	42,5	1,03	1,45
	36	12	0,72	30,5	6,5	72,0	0,27	-0,24
	67	1	0,51	42,5	8,0	17,0	0,59	0,89
	67	18	0,65	36,0	5,4	65,0	-0,34	0,48
	80	13	0,82	34,2	6,6	41,0	-0,27	0,74
	100	2	0,58	30,2	4,6	58,0	-0,13	-0,61
	100	7	0,63	39,4	5,0	21,0	0,03	-0,78
	Ельник липняковый							
	25	13	1,15	38,4	5,2	57,5	-0,21	-0,41
	25	18	0,76	41,0	8,0	25,3	-0,47	-0,64
	80	19	0,82	33,6	5,8	41,0	0,30	-0,05
	80	20	1,36	35,2	6,5	68,0	-0,10	-0,14
100	5	1,38	32,0	6,0	69,0	0,20	-0,23	
132	12	1,05	45,2	4,2	35,0	-0,34	-0,42	
Ельник	Ельник липняковый							
	25	15	4,80	30,0	5,2	32,0	0,08	-0,42
	25	21	2,71	33,2	5,1	49,3	0,16	0,01

больше 3, что свидетельствует о достаточном количестве наблюдений и достоверных результатах.

Для древостоев березы в сосняке липовом отмечаются как положительные, так и отрицательные значения коэффициентов асимметрии и эксцесса ширины годовичного кольца. Зависимость коэффициента асимметрии от возраста не прослеживается, поскольку в случае одинакового возраста, например в 90 лет, его значение составляет +0,59 и -0,42 соответственно. Коэффициент эксцесса проявляет себя аналогично.

Березняки ельника липнякового по коэффициенту асимметрии не отличаются от березняков сосняка липового, однако коэффициент эксцесса при любом возрасте имеет отрицательное значение, что демонстрирует более пологая кривая по сравнению с кривой нормального распределения. В древостоях ельника липнякового коэффициент асимметрии ширины годовичного кольца имеет положительное значение, а коэффициент эксцесса изменяется от -0,42 до +0,01.

Для сравнения ширины годовичных колец березняков в совокупности с другими таксационными показателями в разных типах леса проведен кластерный анализ. Идея кластерного анализа по «*k*-средним» [38] заключается в минимизации суммарного квадратичного отклонения точек кластеров от центров этих кластеров. Оценить результат можно с использованием коэффициента дисперсии, который должен стремиться к единице.

Проведение кластерного анализа по «*k*-средним» с использованием возраста древостоя, среднего диаметра древостоя, средней ширины годовичного кольца в сосняке липовом позволило получить предсказуемые результаты. Выделены четыре кластера: 1 — 30...40 лет; 2 — 55...65; 3 — 70; 4 — 90 лет; при этом коэффициент дисперсии равен 0,79. В ельнике липняковом выявлено три кластера: 1 — 30 лет; 2 — 50...60; 3 — 70 лет; с коэффициентом дисперсии — 0,88. В ельниках ввиду недостаточного количества данных кластерный анализ не выполнялся.

Для проверки гипотезы о равенстве дисперсий внутри образованных кластеров выполнен тест Левена по медиане [7, 10, 12].

Проверка статистической гипотезы с помощью данного теста основана на сравнении значения F -статистики и соответствующей величины p -значения.

Если p -значение меньше выбранного уровня значимости ($p < 0,05$), то нулевая гипотеза отвергается и можно делать вывод о наличии значимых различий в дисперсиях выборок (табл. 7).

Полученные результаты (см. табл. 7) свидетельствуют о наличии равенства в дисперсиях кластера 4 в сосняке липовом, а также в кластере 2 в ельнике липняковом.

Т а б л и ц а 7

Результаты выполнения теста Левена внутри кластеров березовых древостоев

Results of Levene's test within birch stand clusters

Кластер	Возраст древостоев, входящих в кластер, лет	F -статистика	p -значение
Сосняк липовый			
1	55; 55; 60; 60; 65	5,027	0,002
2	30; 40	13,846	0,002
4	90; 90	2,586	0,125
Ельник липняковый			
2	50; 60; 60	1,814	0,182

В кластерах 1 и 2 в березняках сосняка липового нулевая гипотеза отвергается, что свидетельствует о неравенстве дисперсий выборок.

Значение F -статистики оценивается по принципу, чем выше ее значение, тем выше вероятность того, что средние значения не во всех группах равны.

Результаты корреляции Пирсона [39] показали, что существует отрицательная связь средней тесноты между возрастом древостоя элемента леса и шириной годичного кольца в сосняке липовом, но положительная связь средней тесноты — в ельнике липняковом (табл. 8). Чем выше p -значение, тем больше оно поддерживает нулевую гипотезу и свидетельствует об отсутствии различий в выборочной и ожидаемой корреляции.

Т а б л и ц а 8

Корреляция ширины годичного кольца с возрастом древостоя по Пирсону и Спирмену внутри кластеров березовых древостоев

Pearson and Spearman correlations of annual ring width with stand age within birch stand clusters

Наименование показателя	Сосняк липовый		Ельник липняковый	
	по Пирсону	по Спирмену	по Пирсону	по Спирмену
Коэффициент корреляции	-0,628	-0,619	+0,478	+0,677
p -значение	0,052	0,056	0,378	0,139
Ковариация	-1,410	-5,611	1,887	2,300
Тестовая статистика	-2,284	-2,233	1,088	1,838

Т а б л и ц а 9

Матрица коэффициентов парных корреляций средних таксационных показателей и ширины годичных слоев березняков

Matrix of pairwise correlation coefficients of average taxation indices and annual ring width in birch stands

Показатель	Средний возраст	Средний диаметр	Средняя высота	Коэффициент состава березы	Ширина годичного кольца
Сосняк липовый					
Средний возраст	1				
Средний диаметр	0,54	1			
Средняя высота	0,88	0,62	1		
Коэффициент состава березы	-0,40	-0,42	-0,47	1	
Ширина годичного слоя	-0,63	-0,31	-0,55	0,23	1
Ельник липняковый					
Средний возраст	1				
Средний диаметр	0,97	1			
Средняя высота	0,97	0,96	1		
Коэффициент состава березы	-0,35	-0,34	-0,46	1	
Ширина годичного слоя	0,48	0,47	0,39	0,45	1

Т а б л и ц а 1 0

**Сравнительная характеристика ширины годовых колец
при критическом значении $t_{st} = 2,101$**

Comparative characteristics of annual ring widths at the critical value $t_{st} = 2,101$

Квартал (выдел), тип леса		Фактическое значение t_{ϕ}	Результат
21 (17), сосняк липовый	25 (18), ельник липняковый	6,1	Наблюдаемое различие статистически значимо
100 (7), сосняк липовый	25 (13), ельник липняковый	14,4	Наблюдаемое различие статистически значимо
21 (17), сосняк липовый	100 (7), сосняк липовый	1,93	Наблюдаемое различие статистически не значимо
25 (18), ельник липняковый	25 (13), ельник липняковый	10,1	Наблюдаемое различие статистически значимо

Т а б л и ц а 1 1

**Уравнения регрессии зависимости средней ширины годового
кольца Y от возраста дерева A и диаметра ствола $D_{1,3}$
в березняках**

**Regression equations of average annual ring width dependence Y
on tree age A and trunk diameter $D_{1,3}$ in birch forests**

Тип леса	Уравнение	Коэффициент детерминации
Сосняк липовый	$Y = 0,8859 - 0,003902A$	0,39
	$Y = 0,7874 - 0,006026D_{1,3}$	0,10
Ельник липняковый	$Y = 0,6150 + 0,008324A$	0,23
	$Y = 0,5341 + 0,02418 D_{1,3}$	0,23

Т а б л и ц а 1 2

**Уравнения зависимости средней ширины годового кольца Y
от возраста дерева A и диаметра ствола $D_{1,3}$ в березняках**

**Equations of dependence of average annual ring width Y on the tree age A and
trunk diameter $D_{1,3}$ in birch forests**

Тип леса	Уравнение	Коэффициент детерминации
Сосняк липовый	$Y = 0,9341e^{-0,006A}$	0,45
	$Y = -0,214\ln(A) + 1,5155$	0,37
	$Y = -2E - 0,5A^2 - 0,0018A + 0,8269$	0,40
	$Y = 2,5241A^{-0,338}$	0,41
	$Y = 0,7865e^{-0,009 D_{1,3}}$	0,10
	$Y = -0,156\ln(D_{1,3}) + 1,1319$	0,13
	$Y = 0,0012D_{1,3}^2 - 0,0613D_{1,3} + 1,406$	0,19
	$Y = 1,3077D_{1,3}^{-0,23}$	0,12
Ельник липняковый	$Y = 0,7112e^{0,007A}$	0,18
	$Y = 0,3179\ln(A) - 0,185$	0,15
	$Y = 0,001A^2 - 0,0964A + 3,0104$	0,77
	$Y = 0,3742A^{0,2601}$	0,11
	$Y = 0,6654e^{0,0203D_{1,3}}$	0,18
	$Y = 0,4161\ln(D_{1,3}) - 0,2049$	0,16
	$Y = 0,0051D_{1,3}^2 - 0,195D_{1,3} + 2,758$	0,53
	$Y = 0,368D_{1,3}^{0,3406}$	0,12

Ковариация проверяет взаимосвязь между двумя переменными. Диапазон ковариаций не ограничивается ни в отрицательную, ни в положительную сторону. Положительная ковариация свидетельствует, что изменения идут в одном направлении, а отрицательная — показывает противоположное направление, т. е. когда одна переменная увеличивается, вторая переменная, как правило, уменьшается, и наоборот.

Тестовая статистика свидетельствует о том, что полученные результаты находятся в доверительном интервале на уровне 95 %.

Матрица коэффициентов парных корреляций по изучаемым показателям приведена в табл. 9.

Высокой положительной связью обладают отношения среднего диаметра и высоты древостоя с его средним возрастом, а также связь средней высоты и среднего диаметра древостоя. Эти взаимосвязи хорошо известны и объясняются во многих источниках [29, 30, 37, 39].

Корреляция коэффициента состава со средним возрастом, средним диаметром и средней высотой древостоя в рассматриваемых типах леса существенно не отличается и характеризуется как отрицательная слабой тесноты.

Ширина годичного кольца, коррелируя с таксационными показателями в сосняке липовом, характеризуется как средняя и слабая отрицательная, а в ельнике липняковом — как слабая положительная. Для выявления различий в ширине годичных колец в разных типах леса проведено сравнение средних величин по критерию Стьюдента в древостоях 60-летнего возраста. Эта возрастная группа встречается в обоих типах леса [39].

Подтверждено различие в средней ширине годичного кольца не только в разных типах леса, но и в ельнике липняковом при одинаковом среднем возрасте древостоев (табл. 10). В целях моделирования средней ширины годичного кольца составлены уравнения простой регрессии с возрастом и диаметром древостоев [39] (табл. 11), а также проведен подбор уравнений нелинейных функций (табл. 12).

Для получения приемлемых результатов рекомендуется использовать уравнения с коэффициентом детерминации не менее 0,5. Согласно этому условию для описания изучаемых зависимостей в ельнике липняковом наиболее подходит уравнение полинома второй степени. В условиях сосняка липового можно рекомендовать к использованию экспоненциальную зависимость средней ширины годичного кольца от возраста древостоя.

Регрессионные уравнения, представленные в табл. 11, в должной мере не объясняют достаточную долю общей вариации.

Выводы

1. Амплитуда колебания ширины годичного кольца березы в ельнике липняковом выше, чем в сосняке липовом, а ее максимальное значение составляет 1,38 мм.

2. Ширина годичного кольца ели в ельнике липняковом изменяется от 0,4 мм до 5,8 мм, а ее среднее значение равно 3,0 мм.

3. Варьирование ширины годичного кольца березы в среднем составляет 36,0 %, ели — 40,5 %.

4. Зависимость коэффициентов асимметрии и эксцесса средней ширины годичного кольца от возраста древостоя не прослеживается как в березняках, так и в ельниках.

5. Кластерный анализ позволил сформировать семь кластеров в березняках исследуемых типов леса. Выявлены значимые различия в дисперсиях выборок кластеров 1 и 2 сосняка липового.

6. Корреляционный анализ выявил отрицательную связь средней тесноты между возрастом древостоя элемента леса березы и шириной годичного кольца в сосняке липовом и положительную связь средней тесноты в ельнике липняковом.


7. При моделировании изучаемых зависимостей таксационных показателей в ельнике липняковом рекомендуется использовать уравнение полинома второй степени, а в условиях сосняка липового использовать экспоненциальную зависимость средней ширины годичного кольца от возраста древостоя.

Список литературы

- [1] Соколов П.А., Петров А.А. Таксация ельников Прикамья (на примере Удмуртии). Ижевск: Изд-во ИЖГСХА, 2004. 272 с.
- [2] Končrková A., Petek A., Kmet' J., Petřík P., Vedernikov K.E., Zagrebin E.A., Islamova N.A., Grigoriev R.A., Pashkova A.S., Zhuravleva A.N., Bukharina I.L., Hůdková H. Impact of the European bark beetle *ips typographus* on biochemical and growth properties of wood and needles in Siberian spruce *Picea obovata* // Central European Forestry J., 2020, t. 66, no. 4, pp. 243–254.
- [3] Ведерников К.Е. Лесоводственно-таксационное состояние ельников *Piceetum oxalidosum* Удмуртской Республики // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 6. С. 20–30. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-6-20-30
- [4] Петров А.А., Поздеев Д.А., Малышев В.С. Сравнительный анализ ельников и березняков Прикамья по диаметру стволов // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии, 2010. № 4 (25). С. 50–52.
- [5] Соколов П.А., Малышев В.С., Петров А.А., Поздеев Д.А. Таксация леса. Динамика таксационных показателей и надземной фитомассы древостоев березы. Ижевск: Изд-во ИЖГСХА, 2010. 68 с.
- [6] Абсалимов Р.Р., Поздеев Д.А., Якимов М.В., Старков М.Н. Особенности формирования запаса березняков Увинского лесничества Удмуртской республики на участках леса, переданных в аренду ООО «Орион» //

- Научные инновации в развитии отраслей АПК. Материалы Междунар. науч.-практ. конф. В 3 т. 18–21 февраля 2020 г., Ижевск. Ижевск: Изд-во ИжГСХА, 2020. Т. 1. С. 102–107.
- [7] Поздеев Д.А., Якимов М.В., Семакин В.А. Радиальный прирост древесины березняков Увинского лесничества Удмуртской Республики // Научные разработки и инновации в решении стратегических задач агропромышленного комплекса: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. В 2 т. 15–18 февраля 2022 г., г. Ижевск. Ижевск: Изд-во ИжГСХА, 2022. Т. 2. С. 21–29.
- [8] Андреев Г.В., Поздеев Е.Г., Иванчиков С.В., Ходырева Ю.Н. Изучение формирования и роста производного березняка на основе радиального прироста деревьев: Экологические исследования в Висминском биосферном заповеднике. Екатеринбург: Среднеуральское книжное издательство. Новое время, 2006. С. 49–56.
- [9] Андреев Г.В., Алесенков Ю.М. Рост по диаметру березы, ели и сосны и приросты поврежденной ели в длительно-производном травяно-зеленомошном березняке. Красноярск: Изд-во СГТУ, 2013. 18 с.
- [10] Кладько Ю.В., Бенькова В.Е. Радиальный рост древесных видов в условиях антропогенной нагрузки г. Красноярска // Сибирский лесной журнал, 2018. № 4. С. 49–57.
- [11] Манов А.В. Радиальный прирост сосны обыкновенной в островном массиве бора лишайникового Печорского Заполярья // Известия Коми НЦ УрО РАН, 2014. № 4 (20). С. 13–19.
- [12] Рыбаков Д.С. Влияние загрязнения серой на радиальный прирост *Pinus sylvestris* L. в Республике Карелия // Принципы экологии, 2017. № 2 (23). С. 47–60. DOI 10.15393/j1.art.2017.6042
- [13] Колчин Б.А., Черных Н.Б. Дендрохронология Восточной Европы (Абсолютные дендрохронологические шкалы с 788 г. по 1970 г.) / под ред. В.В. Седова. М.: Наука, 1977. 128 с.
- [14] Шведов Ф. Дерево как летопись засух / Сообщ. в годич. заседании Новорос. об-ва естествоиспытателей, янв. 17, 1892 г. СПб.: Тип. Имп. Акад. наук, 1892. 16 с.
- [15] Колчин Б.А., Битвинкас Т.Т. Современные проблемы дендрохронологии. Проблемы абсолютного датирования в археологии. М.: Наука, 1972. С. 80–92.
- [16] Битвинкас Т.Т. К вопросу о применении дендроклиматических методов в лесоустройстве. Современные вопросы лесоустройства. Каунас: Изд-во Литовской сельскохозяйственной академии, 1966. С. 177–179.
- [17] Битвинкас Т.Т. Динамика прироста насаждений и возможности ее прогнозирования (в условиях Литовской ССР) // Доклады Тимирязевской сельскохозяйственной академии, Вып. 99. М.: Изд-во Тимирязевской сельскохозяйственной академии, 1964. С. 497–503.
- [18] Ваганов Е.А., Терсков И.А. Анализ роста дерева по структуре годовых колец / под ред. А.С. Исаева. Новосибирск: Наука. Сибирское отд., 1977. 94 с.
- [19] Ackerman F., Goldblum D. Lodgepole pine and interior spruce radial growth response to climate and topography in the Canadian Rocky Mountains, Alberta // Canadian J. of Forest Research, 2021, no. 51(7), pp. 986–1001. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0305>.
- [20] Koulelis P.P., Fassoulis V.P., Petrakis P.V., Ioannidis K.D., Alexandris S. The impact of selected climatic factors on the growth of Greek fir on Mount Giona in mainland Greece based on tree ring analysis // Austrian J. of Forest Science, 2022, t. 139, no. 1, pp. 1–30.
- [21] Lapis A., Robinson G., Lawrence G. Radial growth decline of white spruce (*Picea glauca*) during hot summers without drought: preliminary results from a study site south of a boreal forest border // Canadian J. of Forest Research, 2022, no. 52(4), pp. 582–590.
- [22] Soro A., Lenz P., Roussel J.R., Larochelle F., Bousquet J., Achim A. The phenotypic and genetic effects of drought induced stress on apical growth, ring width, wood density and biomass in white spruce seedlings // New Forests, 2023, v. 54, pp. 789–811.
- [23] Gauthray-Guyénet V., Schneider R., Achim A., Fortin M., Pare D., Arseneault D. Legacy of forest composition and changes over the long-term on tree radial growth // Canadian J. of Forest Research, 2021, no. 51(10), pp. 1501–1511.
- [24] Yang J., Cooper D.J., Zhang X., Song W., Li Z., Zhang Y., Zhao H., Han S., Wang X. Climatic controls of *Pinus pumila* radial growth along an altitude gradient // New Forests, 2022, v. 53, pp. 319–335. <https://doi.org/10.1007/s11056-021-09858-x>
- [25] Шереметов Р.Т., Уфимцев В. И. Оценка влияния температуры на радиальный прирост сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях техногенного воздействия // Вестник Кемеровского государственного университета, 2012. № 4–1 (52). С. 24–28.
- [26] Теринов Н.Н., Полухин А.В. Сравнение методов измерения годовых колец деревьев и применение этих методов в лесных исследованиях // Журнал Сибирского федерального университета. Биология, 2012. № 1. С. 97–107.
- [27] Tsakalimi M., Petaloudi L-M., Ganatsas P.A Research note on developing a novel method for the estimation of annual volume increment in standing trees // Austrian J. of Forest Sciens, 2023, t. 140, no. 4, pp. 241–248.
- [28] Fischer C., Saborowski J. Variance estimation for mean growth from successive double sampling for stratification // Canadian J. of Forest Research, 2020, no. 50(12), pp. 1405–1411. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0058>
- [29] Верхунов П.М., Черных В.Л. Таксация леса. Йошкар-Ола: Изд-во Марийского государственного технического университета, 2009. 396 с.
- [30] Загреев В.В., Сухих В.И., Швыденко А.З., Гусев И.Н., Мошкалев А.Г. Общесоюзные нормативы для таксации лесов. М.: Колос, 1992. 495 с.
- [31] Черных В.Л., Ворожцов Д.М., Вдовин Е.С. Совершенствование методики выборочной таксации запаса древостоев на примере Учебно-опытного лесничества Республики Марий Эл // Вестник ПГТУ. Серия: Лес. Экология. Природопользование, 2011. № 1. С. 3–10.
- [32] Поздеев Д.А. Таксация леса. Учебная практика. Ижевск: Изд-во ИжГСХА, 2016. 179 с.
- [33] ОСТ 56-69-83. Пробные площади лесоустроительные. Методы закладки. М.: Издательство стандартов, 1983. 59 с.
- [34] Румянцев Д.Е., Липаткин В.А., Черакшев А.В., Воробьева Н.С. Методические рекомендации по отбору ядер древесины для целей дендрохронологических исследований в лесоведении и лесоводстве. М.: Профессиональная наука, 2022. 44 с.
- [35] Лакин Г.Ф. Биометрия. М.: Высшая школа, 1990. 352 с.
- [36] Свалов С.Н. Применение статистических методов в лесоводстве: статья в журнале Итоги науки и техники. М.: Изд-во ВИНТИ, 1985. 164 с.
- [37] Соколов П.А., Черных В.Л. Вариационная статистика. Йошкар-Ола: МарГТУ, 1990. 100 с.
- [38] Мاستицкий С.Э., Шитиков В.К. Статистический анализ и визуализация данных с помощью R. М.: ДМК Пресс, 2015. 496 с.
- [39] Герасимов Ю.Ю., Хлюстов В.К. Математические методы и модели в расчетах на ЭВМ: применение в лесоводстве и экологии. М.: МГУЛ, 2001. 260 с.

Сведения об авторах

Поздеев Денис Александрович  — канд. с.-х. наук, доцент кафедры лесоустройства и экологии, ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный аграрный университет», dap219@mail.ru

Абсальямов Рафаэль Рамзиевич — канд. с.-х. наук, доцент, зав. кафедрой лесоустройства и экологии, ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный аграрный университет», lesovod27@yandex.ru

Якимов Михаил Витальевич — ст. преподаватель кафедры лесоустройства и экологии, ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный аграрный университет», mikhailyackimov@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.04.2024.

Одобрено после рецензирования 15.07.2024.

Принята к публикации 22.08.2024.

COMPARATIVE ANALYSIS OF ANNUAL TREE RINGS WIDTH FOR BIRCH GROVES AND SPRUCE FORESTS IN UVINSKY FORESTRY (UDMURT REPUBLIC)

D.A. Pozdeev , **R.R. Absalyamov**, **M.V. Yakimov**

Udmurt State Agrarian University, 11, Studentskaya st., Izhevsk, 426069, Udmurt Republic, Russia

dap219@mail.ru

The average width of the annual ring of birch in the linden and pine forest is 0,6 mm, in the spruce and linden forest it equals to 1,1 mm, while the average annual ring width of spruce in the linden and spruce forest is 3,0 mm. The variability of the tree species annual ring width, ranging from 30 to 49 %, was shown, while the age variation patterns were not revealed. Groups of stands by age have been formed. The presence of significant differences in the samples variances of the formed clusters was revealed. A correlation analysis was performed, indicating the presence of a relationship between the width of the annual ring and the age of the stand in the studied forest types. The difference in the width of the birch annual ring in different types of forest in stands of the same age has been established. The analysis of simple regression equations with age and diameter of tree trunks is proposed. The selection of equations of nonlinear functions explaining these dependencies is carried out.

Keywords: forest fund, spruce forest, birch forest, trial areas, wood cores, the width of the annual tree ring

Suggested citation: Pozdeev D.A., Absalyamov R.R., Yakimov M.V. *Sravnitel'nyy analiz shiriny godichnyh kolec derev'ev v bereznyakah i el'nikah Uvinskogo lesnichestva (Udmurtskaya Respublika)* [Comparative analysis of annual tree rings width for birch groves and spruce forests in Uvinsky forestry (Udmurt Republic)]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 5, pp. 42–54. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-42-54

References

- [1] Sokolov P.A., Petrov A.A. *Taksatsiya el'nikov Prikam'ya (na primere Udmurtii)* [Taxation of spruce forests in the Kama region (using the example of Udmurtia)]. Izhevsk: IzhGSHA, 2004, 272 p.
- [2] Konôpková A., Petek A., Kmeť J., Petrik P., Vedernikov K.E., Zagrebin E.A., Islamova N.A., Grigoriev R.A., Pashkova A.S., Zhuravleva A.N., Bukharina I.L., Húdoková H. Impact of the European bark beetle *ips typographus* on biochemical and growth properties of wood and needles in Siberian spruce *Picea obovata*. *Central European Forestry J.*, 2020, t. 66, no. 4, pp. 243–254.
- [3] Vedernikov K.E. *Lesovodstvenno-taksatsionnoe sostyanie el'nikov Piceetum oxalidosum Udmurtskoy Respubliki* [Forestry and taxation characteristics of Spruce (*Piceetum oxalidosum*) stands in Udmurt Republic]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 6, pp. 20–30. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-6-20-30
- [4] Petrov A.A., Pozdeev D.A., Malyshev V.S. *Sravnitel'nyy analiz el'nikov i bereznyakov Prikam'ya po diametru stvolov* [Comparative analysis of spruce and birch forests of the Kama region by trunk diameter]. *Vestnik Izhevskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* [Bulletin of the Izhevsk State Agricultural Academy], 2010, no. 4 (25), pp. 50–52.
- [5] Sokolov P.A., Malyshev V.S., Petrov A.A., Pozdeev D.A. *Taksatsiya lesa. Dinamika taksatsionnykh pokazateley i nadzemnoy fitomassy drevostoev berezy* [Forest taxation. Dynamics of taxation indicators and above-ground phytomass of birch stands]. Izhevsk: Izhevsk State Agricultural Academy, 2010, 68 p.
- [6] Absalyamov R.R., Pozdeev D.A., Yakimov M.V., Starkov M.N. *Osobennosti formirovaniya zapasa bereznyakov Uvinskogo lesnichestva Udmurtskoy respubliki na uchastkakh lesa, peredannykh v arendu OOO «Orion»* [Features of the formation of a stock of birch forests in the Uvinsky forestry of the Udmurt Republic on forest plots leased to Orion LLC]. *Nauchnye innovatsii v razvitiy otrasley APK. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Scientific innovations in the development of agricultural industries. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference]. In 3 t. February 18–21, 2020, Izhevsk. Izhevsk: Izhevsk State Agricultural Academy, 2020, t. 1, pp. 102–107.

- [7] Pozdeev D. A., Yakimov M. V., Semakin V. A. *Radial'nyy prirost drevesiny bereznyakov Uvinskogo lesnichestva Udmurtskoy Respubliki* [Radial growth of birch forest wood of the Uvinsky forestry of the Udmurt Republic]. Nauchnye razrabotki i innovatsii v reshenii strategicheskikh zadach agropromyshlennogo kompleksa: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Scientific developments and innovations in solving strategic problems of the agro-industrial complex: materials of the International scientific-practical conference]. In 2 t., February 15–18, 2022, Izhevsk. Izhevsk: Izhevsk State Agricultural Academy, 2022, t. 2, pp. 21–29.
- [8] Andreev G.V., Pozdeev E.G., Ivanchikov S.V., Khodyreva Yu.N. *Izuchenie formirovaniya i rosta proizvodnogo bereznyaka na osnove radial'nogo prirosta derev'ev: Ekologicheskie issledovaniya v Visminskom biosfernom zapovednike* [Study of the formation and growth of a derivative birch forest based on the radial growth of trees: Ecological studies in the Visminsky Biosphere Reserve]. Ekaterinburg: Middle Ural Book Publishing House New Time, 2006, pp. 49–56.
- [9] Andreev G.V., Alesenkov Yu.M. *Rost po diametru berez, eli i sosny i prirosty povrezhdennoy eli v dlitel'no-proizvodnom travyano-zelenomoshnom bereznyake* [Growth in diameter of birch, spruce and pine and growth of damaged spruce in a long-term derived grass-green-moss birch forest]. Krasnoyarsk: SSTU publishing house, 2013, 18 p.
- [10] Klad'ko Yu.V., Ben'kova V.E. *Radial'nyy rost drevesnykh vidov v usloviyakh antropogennoy nagruzki g. Krasnoyarska* [Radial growth of tree species under conditions of anthropogenic load in Krasnoyarsk]. Sibirskiy lesnoy zhurnal [Siberian Forest Journal], 2018, no. 4, pp. 49–57.
- [11] Manov A.V. *Radial'nyy prirost sosny obyknovnoy v ostrovnom massive bora lishaynikovogo Pechorskogo Zapolyar'ya* [Radial growth of Scots pine in the island massif of the lichen boron of the Pechora Arctic]. Izvestiya Komi NTs UrO RAN [Izvestia of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences], 2014, no. 4 (20), pp. 13–19.
- [12] Rybakov D.S. *Vliyaniye zagryazneniya seroy na radial'nyy prirost Pinus sylvestris L. v Respublike Kareliya* [The influence of sulfur pollution on the radial growth of Pinus sylvestris L. in the Republic of Karelia]. Printsipy ekologii [Principles of Ecology], 2017, no. 2 (23), pp. 47–60. DOI 10.15393/j1.art.2017.6042
- [13] Kolchin B.A., Chernykh N.B. *Dendrokronologiya Vostochnoy Evropy (Absolyutnye dendrokronologicheskie shkaly s 788 g. po 1970 g.)* [Dendrochronology of Eastern Europe (Absolute dendrochronological scales from 788 to 1970)]. Ed. V.V. Sedov. Moscow: Nauka, 1977, 128 p.
- [14] Shvedov F. *Derevo kak letopis' zasukh. Soobshch. v godich. zasedanii Novoros. ob-va. estestvoispytateley* [The tree is like a chronicle of droughts. The message in a year the meeting of Novorossiia about Naturalists], Jan. 17, 1892. St. Petersburg: Print. Imp. Acad. Sciences, 1892, 16 p.
- [15] Kolchin B.A., Bitvinskas T.T. *Sovremennye problemy dendrokronologii. Problemy absolyutnogo datirovaniya v arkhologii* [Modern problems of dendrochronology. Problems of absolute dating in archaeology]. Moscow: Nauka, 1972, pp. 80–92.
- [16] Bitvinskas T.T. *K voprosu o primenenii dendroklimaticeskikh metodov v lesoustroystve. Sovremennye voprosy lesoustroystva* [On the issue of using dendroclimatic methods in forest management. Modern issues of forest management]. Kaunas: Lithuanian Agricultural Academy, 1966, pp. 177–179.
- [17] Bitvinskas T.T. *Dinamika prirosta nasazhdeniy i vozmozhnosti eeprognozirovaniya (v usloviyakh Litovskoy SSR)* [Dynamics of plant growth and the possibility of its forecasting (in the conditions of the Lithuanian SSR)]. [Reports of the Timiryazev Agricultural Academy], v. 99. Moscow: Timiryazev Agricultural Academy, 1964, pp. 497–503.
- [18] Vaganov E.A., Terskov I.A. *Analiz rosta dereva po strukture godichnykh kolets* [Analysis of tree growth based on the structure of tree rings]. Ed. A.S. Isaev. Novosibirsk: Science. Siberian department, 1977, 94 p.
- [19] Ackerman F., Goldblum D. Lodgepole pine and interior spruce radial growth response to climate and topography in the Canadian Rocky Mountains, Alberta. Canadian J. of Forest Research, 2021, no. 51(7), pp. 986–1001. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0305>.
- [20] Koulelis P.P., Fassoulis V.P., Petrakis P.V., Ioannidis K.D., Alexandris S. The impact of selected climatic factors on the growth of Greek fir on Mount Giona in mainland Greece based on tree ring analysis. Austrian J. of Forest Science, 2022, t. 139, no. 1, pp. 1–30.
- [21] Lapenis A., Robinson G., Lawrence G. Radial growth decline of white spruce (*Picea glauca*) during hot summers without drought: preliminary results from a study site south of a boreal forest border. Canadian J. of Forest Research, 2022, no. 52(4), pp. 582–590.
- [22] Soro A., Lenz P., Roussel J.R., Larochelle F., Bousquet J., Achim A. The phenotypic and genetic effects of drought induced stress on apical growth, ring width, wood density and biomass in white spruce seedlings. New Forests, 2023, v. 54, pp. 789–811.
- [23] Gauthray-Guyénet V., Schneider R., Achim A., Fortin M., Pare D., Arseneault D. Legacy of forest composition and changes over the long-term on tree radial growth. Canadian J. of Forest Research, 2021, no. 51(10), pp. 1501–1511.
- [24] Yang J., Cooper D.J., Zhang X., Song W., Li Z., Zhang Y., Zhao H., Han S., Wang X. Climatic controls of *Pinus pumila* radial growth along an altitude gradient. New Forests, 2022, v. 53, pp. 319–335. <https://doi.org/10.1007/s11056-021-09858-x>
- [25] Sheremetov R.T., Ufimtsev V.I. *Otsenka vliyaniya temperatury na radial'nyy prirost sosny obyknovnoy (Pinus sylvestris L.) v usloviyakh tekhnogennogo vozdeystviya* [Assessment of the influence of temperature on the radial growth of Scots pine (*Pinus sylvestris L.*) under conditions of anthropogenic impact]. Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of Kemerovo State University], 2012, no. 4–1 (52), pp. 24–28.
- [26] Terinov N.N., Polukhin A.V. *Sravnienie metodov izmereniya godichnykh kolets derev'ev i primenenie etikh metodov v lesnykh issledovaniyakh* [Comparison of methods for measuring tree rings and the application of these methods in forest research]. Zhurnal SFU. Biologiya [J. of Siberian Federal University. Biology], 2012, no. 1, pp. 97–107.
- [27] Tsakaldimi M., Petaloudi L.-M., Ganatsas P.A. Research note on developing a novel method for the estimation of annual volume increment in standing trees. Austrian J. of Forest Sciens, 2023, t. 140, no. 4, pp. 241–248.
- [28] Fischer C., Saborowski J. Variance estimation for mean growth from successive double sampling for stratification. Canadian J. of Forest Research, 2020, no. 50(12), pp. 1405–1411. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0058>

- [29] Verkhunov P.M., Chernykh V.L. *Taksatsiya lesa* [Forest taxation]. Yoshkar-Ola: Mari State Technical University, 2009, 396 p.
- [30] Zagreev V.V., Sukhikh V.I., Shvydenko A.Z., Gusev I.N., Moshkalev A.G. *Obshchesoyuznye normativy dlya taksatsii lesov* [All-Union standards for forest taxation]. Moscow: Kolos, 1992, 495 p.
- [31] Chernykh V.L., Vorozhtsov D.M., Vdovin E.S. *Sovershenstvovanie metodiki vyborochnoy taksatsii zapasa drevostoev na primere Uchebno-opytного lesnichestva Respubliki Mariy El* [Improving the methodology for selective taxation of forest stands using the example of the Educational and Experimental Forestry of the Republic of Mari El]. Vestnik PGU. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie [Bulletin of Perm State Technical University. Series: Forest. Ecology. Nature Management], 2011, no. 1, pp. 3–10.
- [32] Pozdeev D.A. *Taksatsiya lesa. Uchebnaya praktika* [Forest taxation. Educational practice]. Izhevsk: Izhevsk State Agricultural Academy, 2016, 179 p.
- [33] *OST 56-69–83. Probnye ploshchadi lesoustroitel'nye. Metody zakladki* [OST 56-69–83 Trial areas for forest management. Bookmark methods]. Moscow: Publishing house of standards, 1983, 59 p.
- [34] Rummyantsev D.E., Lipatkin V.A., Cherakshv A.V., Vorob'eva N.S. *Metodicheskie rekomendatsii po otboru kernov drevesiny dlya tseley dendrokronologicheskikh issledovaniy v lesovedenii i lesovodstve* [Methodological recommendations for the selection of wood cores for the purposes of dendrochronological studies in forestry and silviculture]. Moscow: Professional Science, 2022, 44 p.
- [35] Lakin G.F. *Biometriya* [Biometrics]. Moscow: Higher School, 1990, 352 p.
- [36] Svalov S.N. *Primenenie statisticheskikh metodov v lesovodstve: stat'ya v zhurnale Itogi nauki i tekhniki* [Application of statistical methods in forestry: article in the journal Itogi Nauki i Tekhniki]. Moscow: VINITI, 1985, 164 p.
- [37] Sokolov P.A., Chernykh V.L. *Variatsionnaya statistika* [Variation statistics]. Yoshkar-Ola: MarSTU, 1990, 100 p.
- [38] Mastitskiy S.E., Shitikov V.K. *Statisticheskiy analiz i vizualizatsiya dannykh s pomoshch'yu R* [Statistical analysis and visualization of data using R]. Moscow: DMK Press, 2015, 496 p.
- [39] Gerasimov Yu.Yu., Khlyustov V.K. *Matematicheskie metody i modeli v raschetakh na EVM: primeneniye v lesoupravlenii i ekologii* [Mathematical methods and models in computer calculations: application in forest management and ecology]. Moscow: MGUL, 2001, 260 p.

Authors' information

Pozdeev Denis Aleksandrovich  — Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor of the Department of forest management and ecology, Udmurt State Agrarian University, dap219@mail.ru

Absalyamov Rafael' Ramzievich — Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor, Head of the Department of Forest management and ecology, Udmurt State Agrarian University, lesovod27@yandex.ru

Yakimov Mikhail Vital'evich — Senior Lecturer of the Department of forest management and ecology, Udmurt State Agrarian University, mikhailiyackimov@yandex.ru

Received 10.04.2024.

Approved after review 15.07.2024.

Accepted for publication 22.08.2024.

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

РОСТ СЕЯНЦЕВ СОСНЫ КЕДРОВОЙ СИБИРСКОЙ С ЗАКРЫТОЙ КОРНЕВОЙ СИСТЕМОЙ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СУБСТРАТАХ

Д.А. Коновалова[✉], Н.П. Братилова, А.В. Мантулина, А.А. Коротков

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», Россия, 660037, г. Красноярск, проспект имени газеты «Красноярский рабочий», д. 31

konovalova_da@sibsau.ru

Проанализирован рост и развитие однолетних сеянцев сосны кедровой сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour), выращиваемых на смесях с использованием торфа или кокосового волокна с добавлением вермикулита, перлита в разных пропорциях. Установлено, что к концу первого вегетационного периода (2021) средняя масса надземной части сеянцев в среднем составила $1,1 \pm 0,03$ мг, корней — $0,4 \pm 0,02$ мг в абсолютно сухом состоянии. Указано влияние состава субстрата на рост сеянцев сосны кедровой сибирской с закрытой корневой системой. Выявлено, что сеянцы, выращиваемые на торфяных субстратах, отличаются более быстрым ростом надземной части, но отстают по формированию корневой системы в сравнении с сеянцами на кокосовых смесях. Проанализировано влияние размера кома на рост сеянцев. Рекомендуется выращивать сеянцы сосны кедровой сибирской в субстратах объемом не менее 85 см^3 , отдавая предпочтение более вместительным емкостям.

Ключевые слова: сосна кедровая сибирская, сеянцы с закрытой корневой системой, субстраты, торф, кокосовое волокно, объем кома

Ссылка для цитирования: Коновалова Д.А., Братилова Н.П., Мантулина А.В., Коротков А.А. Рост сеянцев сосны кедровой сибирской с закрытой корневой системой на экспериментальных субстратах // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 5. С. 55–67. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-55-67

Отечественная практика искусственного лесовосстановления насчитывает более 300 лет [1]. С середины XX в. посадочный материал с закрытой корневой системой (ЗКС) стал использоваться более активно [2]. Считается, что история зарождения такого вида посадочного материала зародилась в 1950-х годах в Германии. Однако в начале проведения лесовосстановительных работ с использованием посадочного материала с ЗКС оказалось недостаточно рентабельным и излишне трудоемким [3].

В России посадочный материал с ЗКС начали использовать в 1970-х годах, хотя сначала это не получило широкого распространения. В настоящее время в лесокультурном производстве России возобновлено применение данного посадочного материала [4–8]. Ученые и инженеры в сфере лесного хозяйства тщательно изучают опыт лесовосстановления с использованием посадочного материала с ЗКС [9–15].

Неоспоримым достоинством применения посадочного материала с ЗКС является возможность значительного продлевания сроков посадки культур, а также освоения труднодоступных мест, где использование традиционного посадочного материала практически невозможно [16]. Для засушливых лесорастительных условий при облесении песчаных дюн и в степной зоне некоторые ученые рекомендуют использовать посадочный материал

с ЗКС, поскольку он более жизнеспособен по сравнению с традиционным посадочным материалом, что позволяет получить лучшие результаты [17, 18]. В некоторых регионах возможна зимняя посадка сеянцев с ЗКС. Так, на Дальнем Востоке в зимний период проводилась посадка ели аянской (*Picea jezoensis*), сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) и лиственницы даурской (*Larix dahurica*), а на Северо-Западе России — ели обыкновенной (*Picea abies*) [16].

По мнению В.П. Бессчетнова и соавторов [9], сеянцы сосны обыкновенной с ЗКС отставали в развитии от сеянцев с открытой корневой системой (ОКС), что связано с ограниченным объемом кома и дисбалансом в развитии надземной и подземной частей растений. Е.В. Жигунов и др., сравнивая рост сеянцев с ЗКС сосны обыкновенной, лиственницы Сукачева (*Larix Sukaczewii*) и ели сибирской (*Picea obovata*) в близких условиях в зимний период (конец февраля) в теплице с дополнительной досветкой, установили, что лиственница Сукачева отличалась лучшим ростом и за один вегетационный сезон достигала или даже превосходила стандартные размеры. А сосна обыкновенная и ель сибирская не способны достигнуть стандартных размеров, вследствие чего необходимо их доращивать на открытых площадках. При выращивании посадочного материала в кассетах вследствие не всегда правильного размера ячеек наблюдается загибание стержневого корня, что является причиной задержки его развития

и роста системы горизонтальных корней при высаживании на лесокультурную площадь. Такие сеянцы на песчаных почвах не успевают достичь стержневым корнем уровня капиллярной влаги и могут погибнуть из-за ее нехватки [19].

Еще одной проблемой в некоторых районах при создании лесных культур с использованием посадочного материала с ЗКС является их приживаемость на первоначальном этапе. В первые месяцы после посадки корни сеянцев с ЗКС продолжают использовать питательные вещества из торфяного брикета, не осваивая прилегающих слоев почвы, что приводит к пересыханию верхних горизонтов почвы и возможной гибели растений [20]. Е.М. Ананьев [20] на основании результатов проведенных исследований считает, что в некоторых случаях причиной низкой приживаемости сеянцев с ЗКС является нарушение технологии посадки, в частности механизированная посадка и посадка под меч Колесова.

Причиной невысокой приживаемости сеянцев могут стать и жесткие климатические условия. Так, в Алтайском крае при создании лесных культур сеянцами с ЗКС на гаях по причине высокой температуры поверхностный слой почвы пересыхает, что также вызывает завядание и отпад [21].

Исследований, посвященных выращиванию сосны кедровой сибирской сеянцами с ЗКС, в настоящее время недостаточно [22–26], что, видимо, связано с преимущественным использованием в современном лесовосстановительном процессе других хвойных пород — ели и сосны. Е.В. Титов [27] указал, что для выращивания посадочного материала с ЗКС кедр сибирского следует использовать контейнеры объемом не менее 200...300 см³, а субстрат готовить из смеси торфа и суглинка (1:1) с добавлением в качестве удобрений суперфосфата гранулированного, калийной соли и доломитовой извести.

У сеянцев сосны кедровой сибирской с ЗКС формируются мелкие корни, нежели при ОКС [28]. Высказано мнение о целесообразности внесения гетероауксина для интенсификации развития корней и предотвращения вытягивания и последующего полегания кедровых сеянцев с ЗКС [29]. Отмечается положительное влияние обработки крезацином на прирост фитомассы сеянцев [30].

Для успешного выращивания посадочного материала с ЗКС следует учесть множество факторов, в частности, состав субстрата и размер кома как один из существенных.

И.И. Бородин [31] указал на небольшое количество органических материалов, которые используются в мировой практике для изготовления субстратов. По его мнению, такими материалами являются торф, кокосовая пальма, древесина и

компостные материалы. В настоящее время в качестве субстрата чаще всего используется торф.

Считается, что более предпочтителен для сеянцев хвойных пород верховой торф [32]. По мнению некоторых авторов, для выращивания кедровых сеянцев можно использовать также низинный торф или его смесь с лесной почвой [33]. Однако массовое применение торфяных субстратов для выращивания посадочного материала с ЗКС может постепенно привести к дефициту и удорожанию данного вида продукции, истощению торфяных запасов [34].

Большое внимание в качестве замещающего субстрата уделяется кокосовому волокну. Некоторые исследователи рекомендуют добавлять к субстрату микоризу, отмечая ее положительное влияние ко 2–3-му году после посадки [35].

Микориза обеспечивает сеянцы водой и питательными веществами, способствует увеличению приживаемости и интенсивности роста [35]. Экспериментальным путем J.M. Тгарре [36] было установлено, что при посадке растений в почву с микоризными грибами сеянцы приживаются и растут лучше, чем в немикоризированном грунте. Мицелий микоризы улучшает питание и рост растений, усиливает поглощение воды и минеральных элементов [37]. Добавление в торфяной субстрат органики снижает рост сеянцев, но увеличивает интенсивность микоризации, и, как следствие, повышаются показатели роста культур [35, 38]. Значительное влияние на развитие корневой системы сеянцев оказывает внесение микоризной земли и гидрогелей в субстрат [39]. Отмечается, что сосущие корни с микоризой дольше живут, лучше функционируют и интенсивнее дышат [40].

Е.О. Графова и соавторы [41] сравнивали заводские торфяные смеси для выращивания сеянцев с почвенными субстратами, полученными компостированием опилок или коры сосны с добавлением (в качестве азотной составляющей) осадка сточных вод близлежащих предприятий жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ). По их мнению, данные субстраты целесообразно использовать при рекультивации нарушенных территорий.

Д.И. Мухортов и соавторы [42] считают, что агрофизические свойства субстрата оказывают более сильное влияние на рост и развитие посадочного материала с ЗКС, чем агрохимические. От плотности субстрата зависит накопление фитомассы сеянцев. С увеличением доли агроперлита в субстрате, его плотность сложения увеличивается более чем на 50 %.

При выращивании растений по малообъемной технологии (в кассетах) повышаются требования к качеству питательного субстрата и его

физико-химическим характеристикам (аэрируемости, влагоемкости, плотности и т. д.). Такой субстрат в течение 2–3 лет не должен поддаваться существенному микробиологическому разложению. Подобными свойствами обладает верховой сфагновый торф [43].

Смешивая субстраты на основе верхового сфагнового торфа, необходимо учитывать его физико-химические свойства и при этом не ухудшить полученную смесь. Субстрат должен обеспечивать необходимый водно-воздушный и питательный режимы корневой системы сеянцев [44].

Одним из возможных недорогих способов утилизации древесных отходов является их компостирование для приготовления субстратов [45].

Использование компостов древесных отходов в лесных питомниках повышает почвенное плодородие, увеличивает выход стандартного посадочного материала и повышает его качество, что доказано многочисленными исследованиями [45, 46].

И.Г. Сабирзянов и соавторы [47] выращивали сеянцы сосны обыкновенной на торфяных субстратах малой плотности с добавлением агроперлита, минеральных, органических компонентов и почвенной микоризы. По их мнению, такие субстраты положительно влияют на рост сеянцев, что позволяет ускорить получение стандартного посадочного материала.

По мнению А.В. Жигунова [48], применение кассет «ПЛАНТЕК-Ф» с небольшим объемом, с одной стороны, повышает выход посадочного материала, с другой — нежелательно для условий, где основным конкурентом лесным культурам является травянистая растительность. Н.П. Чернобровкина и соавторы [49] отметили зависимость качества создаваемых лесных культур от вида и объема кассет, которые использовались при выращивании сеянцев.

Цель работы

Цель работы — изучение влияния состава субстрата на рост сеянцев сосны кедровой сибирской с ЗКС.

Материалы и методы

Исследования по выращиванию посадочного материала сосны кедровой сибирской проводились в течение трех вегетационных периодов (2021–2023 гг.). Объектом исследований служили всходы и сеянцы сосны кедровой сибирской (*Pinus sibirica*) с ЗКС первого года выращивания. Семена для посева были собраны в лесничествах Красноярского края (табл. 1), где они подвергались стратификации в условиях зимних непромерзающих траншей.

Для выращивания посадочного материала использовались разные варианты субстратов. В настоящей работе проанализированы развитие и рост сеянцев, выращиваемых на смесях с использованием торфа или кокосового волокна с добавлением вермикулита, перлита в разных пропорциях.

В качестве контрольного субстрата использовался торф. В процессе исследований авторы пытались подобрать торф, наиболее подходящий по характеристикам для сеянцев сосны кедровой сибирской. В 2021 г. применяли торф нейтральный «Агробалт-садовый» (обозначение варианта Т-21) с рН = 7,0. В 2022 г. — торфосмесь по рецепту № 19с/1 производства компании ООО «ВЕЛ-ТОРФ» с добавлением агроперлита (обозначение варианта Т₈Ап₂-22). В 2023 г. использовался торф нейтральный — «Агробалт-Н» (обозначение варианта Т-23) с рН = 5,5...6,0.

Для оптимизации характеристик смесей были исследованы субстраты, содержащие перлит, вермикулит, кокосовое волокно в разных пропорциях. В 2021 г. также были исследованы субстраты с добавлением почвы зараженной микоризой, которая была накопана на кедровых плантациях, расположенных в пригородной зоне г. Красноярска (табл. 2).

В эксперименте 2021 г. посев семян проводился в пластиковые стаканчики объемом 200 см³ с нанесением отверстий на нижнюю часть. В 2022–2023 гг. использовались специальные кассеты Plantek-81F с объемом ячейки 85 см³ (рис. 1).

Т а б л и ц а 1

Происхождение, место и способ выращивания сеянцев кедра сибирского с закрытой корневой системой

Origin, place and method of cultivation of Siberian stone seedlings with root-balled tree system

Место происхождения семян	Срок сбора семян	Срок посева	Срок измерений	Место и способ выращивания
Емельяновское	Сентябрь 2020	Июнь 2021	Август 2021	Оранжерея СибГУ им. М.Ф. Решетнева, стаканчики с субстратом
Северо-Енисейское	Сентябрь 2021	Июнь 2022	Август 2022	ООО «Красноярский лесопитомник» кассеты с субстратом
Тюхтетское	Сентябрь 2022	Июнь 2023	Август 2023	ООО «Красноярский лесопитомник» кассеты с субстратом

Т а б л и ц а 2

Экспериментальные варианты субстратов

Experimental variants of substrates

Обозначение варианта	Субстрат	Пропорции смеси, %
2021 г.		
К-21	Кокосовый субстрат	100
К ₈₈ П ₁₂ -21	Кокосовый субстрат с добавлением перлита	88/12
К ₈₈ В ₁₂ -21	Кокосовый субстрат с добавлением вермикулита	88/12
КТ-21	Кокосовый субстрат с торфом	50/50
К ₉₀ П ₅ В ₅ -21	Кокосовый субстрат с перлитом и вермикулитом	90/5/5
Т-21	Торф (контроль)	100
Т ₈₈ П ₁₂ -21	Торф с добавлением перлита	88/12
Т ₈₈ В ₁₂ -21	Торф с добавлением вермикулита	88/12
Т ₉₀ П ₅ В ₅ -21	Торф с перлитом 5 % и вермикулитом	90/5/5
КМ-21	Кокосовый субстрат с добавлением почвы смикоризой	50/50
2022 г.		
Т ₈ Ап ₂ -22	Торфо-смесь (контроль)	80/20
К-22	Кокосовый субстрат	100
КП-22	Кокосовый субстрат с перлитом	50/50
КВ-22	Кокосовый субстрат с вермикулитом	50/50
2023 г.		
Т-23	Торф (контроль)	100
К-23	Кокосовый субстрат	100
Т ₃ К ₁ -23	Торф с кокосовым волокном	75/25
Т ₃ П ₁ -23	Торф с добавлением перлита	75/25



Рис. 1. Сеянцы сосны кедровой сибирской с закрытой корневой системой в опытах 2021–2022 гг.
 Fig. 1. Seedlings of Siberian stone pine with root-balled system in the experiments of 2021–2022

Замеры высоты и диаметра у шейки корня сеянцев проводили с помощью цифрового штангенциркуля TOPEX 150 мм 31С628. Модельные сеянцы высушивали до абсолютно сухого состояния при температуре 105 °С в сушильном шкафу ШС-80-01СПУ. Взвешивание проводили на электронных весах МН-100 100g/0,01g.

Обработка результатов наблюдений проводилась в программе Microsoft Excel, уровень изменчивости признаков определяли по шкале С.А. Мамаева [50].

Результаты и обсуждение

Сеянцы сосны кедровой сибирской, выращенные из семян Емельяновского лесничества в пластиковых стаканчиках, в условиях оранжереи сформировали от 8 до 15 семядолей средней длиной $3,4 \pm 0,04$ см и первичную хвою, которая имела длину $1,2 \pm 0,02$ см. Средняя высота сеянцев (расстояние от корневой шейки до семядолей) составила $3,0 \pm 0,06$ см при диаметре у шейки корня $1,7 \pm 0,04$ мм. Масса надземной

Т а б л и ц а 3

Показатели однолетних сеянцев (опыт 2021 г.)

Indicators of annual seedlings (2021 experiment)

Показатель	Среднее значение X_{cp}	Ошибка, $\pm m$	Среднее стандартное отклонение, $\pm \sigma$	Точность опыта P , %	Коэффициент варибельности V , %
Высота, см	3,0	0,06	0,86	2,1	28,6
Диаметр, мм	1,7	0,04	0,49	2,0	28,5
Длина семядолей, см	3,4	0,04	0,61	1,3	17,9
Длина первичной хвои, см	1,2	0,02	0,34	2,1	29,6
Длина корня, см	9,5	0,56	3,73	5,8	39,2
Масса корня в абсолютно сухом состоянии, мг	0,4	0,02	0,16	5,4	35,9
Масса надземной части в абсолютно сухом состоянии, мг	1,1	0,03	0,23	3,1	20,9

Т а б л и ц а 4

Размеры однолетних сеянцев (опыт 2021 г.), выращенных на субстратах разного состава

Dimensions of annual seedlings (experiment 2021) grown on substrates of different composition

Обозначение варианта	Среднее значение X_{cp}	Ошибка, $\pm m$	Точность опыта P , %	Коэффициент варибельности V , %	Критерий Стьюдента t_{ϕ} при $t_{0,5} = 2,04$ $t_{10} = 1,70$
Высота, см					
T-21	3,8	0,20	5,4	23,7	–
T ₈₈ П ₁₂ -21	2,5	0,25	10,0	35,7	4,06
T ₈₈ B ₁₂ -21	3,1	0,17	5,5	22,8	2,67
T ₉₀ П ₅ B ₅ -21	3,4	0,20	5,9	25,1	1,41
K-21	2,4	0,15	6,1	24,3	5,60
K ₈₈ П ₁₂ -21	2,8	0,17	5,9	26,6	3,81
K ₈₈ B ₁₂ -21	3,4	0,16	4,7	20,9	1,56
KT-21	2,9	0,22	7,6	28,3	3,03
K ₉₀ П ₅ B ₅ -21	3,3	0,14	4,4	22,4	2,05
KM-21	2,7	0,21	7,9	20,8	3,79
Диаметр, мм					
T-21	1,7	0,10	6,3	27,4	–
T ₈₈ П ₁₂ -21	1,3	0,06	5,0	17,3	3,43
T ₈₈ B ₁₂ -21	1,9	0,06	3,2	13,4	1,71
T ₉₀ П ₅ B ₅ -21	1,6	0,06	3,9	16,7	0,86
K-21	1,4	0,06	4,4	17,5	2,57
K ₈₈ П ₁₂ -21	1,5	0,05	3,3	14,6	1,79
K ₈₈ B ₁₂ -21	1,9	0,04	1,9	8,4	1,86
KT-21	1,9	0,09	4,6	17,1	1,49
K ₉₀ П ₅ B ₅ -21	1,6	0,04	2,3	11,9	0,93
KM-21	2,0	0,08	3,8	10,1	2,34

части сеянцев в среднем составила $1,1 \pm 0,03$ мг в абсолютно сухом состоянии. К концу первого вегетационного периода сеянцы имели корни средней длиной $9,1 \pm 0,62$ см, массой $0,4 \pm 0,02$ мг в абсолютно сухом состоянии. Отмечен средний уровень изменчивости показателя длины семядолей, повышенный — остальных линейных размеров сеянцев и их надземной массы. Высокий уровень изменчивости отмечался по показателям корневой системы, ее длины и массы (табл. 3).

В зависимости от состава субстратов, в которых выращивались сеянцы, их высота составляла от 2,4 до 3,8 см, диаметр у шейки корня — от 1,3 до 2,0 мм (табл. 4).

Из табл. 4 видно, что сеянцы, выросшие на чистом торфе, к концу первого вегетационного периода обгоняют по высоте сеянцы большинства остальных вариантов. Различия не являются достоверными лишь в смеси торфа с добавлением перлита и вермикулита (T₉₀П₅B₅-21) и смеси



Рис. 2. Модельные сеянцы сосны кедровой сибирской
Fig. 2. Model seedlings of Siberian stone pine



a



b

Рис. 3. Сеянцы сосны кедровой сибирской, выращенные на субстратах разного состава: *a* — с кокосовым волокном; *b* — с торфом

Fig. 3. Siberian stone seedlings grown on substrates of different composition: *a* — with coconut fibre; *b* — with peat

кокоса и вермикулита ($K_{88}B_{12}-21$) ($t_{\phi} < t_{05}$). Однако диаметр у шейки корня сеянцев отличается большими размерами в вариантах субстратов с добавлением микоризы ($K_{m}-21$, $t_{\phi} > t_{05}$), кокоса с добавлением вермикулита ($K_{88}B_{12}-21$) и торфа с вермикулитом ($T_{88}B_{12}-21$). Различия по двум последним вариантам подтверждаются при 90%-м уровне вероятности ($t_{\phi} > t_{10}$). Использование в качестве субстрата 100%-го кокосового волокна отрицательно сказывается на линейных размерах сеянцев. Также негативное воздействие на рост однолетних кедровых сеянцев оказывает добавление перлита. Сеянцы, выросшие на субстратах, где к торфу или кокосу добавлен перлит, характеризовались меньшими размерами по сравнению с контрольными образцами.

В конце вегетационного сезона большая часть сеянцев была отправлена на доращивание, часть сеянцев взята в качестве модельных для определения размеров их корней и формируемой фитомассы (рис. 2).

Выявлено, что сеянцы, выращиваемые на субстратах, где основным компонентом был торф, формируют корни достоверно меньшей длины и массы (табл. 5, рис. 3).

Наименьшие размеры корней были отмечены на субстрате из торфа в сочетании с перлитом ($T_{88}П_{12}-21$). Их средняя длина составляла $5,7 \pm 0,56$ см. При этом длина корней на чистом торфе (вариант Т-21) составила $8,3 \pm 0,48$ см, а на чистом кокосовом субстрате (К-21) — $11,4 \pm 0,76$ см.

В опытах 2022–2023 гг. на основе полученных ранее результатов было проведено дополнительное исследование по влиянию субстратов на рост сеянцев сосны кедровой сибирской.

Установлено, что в варианте с кокосовым субстратом, смешанным поровну с вермикулитом (вариант KB-22), размеры однолетних сеянцев к концу вегетационного периода отличались достоверно большими размерами надземной части по сравнению с торфосмесью компании ООО «ВЕЛ-ТОРФ» с добавлением агроперлита (вариант $T_8A_{п2}-22$) (табл. 6).

Внесение перлита в состав смеси (опыт 2023 г.) оказывало негативное воздействие на рост однолетних сеянцев (табл. 7).

Выводы

1. При посеве семян после траншейной стратификации в июне сеянцы сосны кедровой сибирской без внесения удобрений и стимуляторов роста к концу вегетационного сезона не успевают достичь стандартных размеров для лесокультурного производства и нуждаются в доращивании.

2. Корневая система однолетних сеянцев отличается лучшими характеристиками роста и

Т а б л и ц а 5

**Показатели модельных однолетних сеянцев опыта 2021 г.,
выращенных на субстратах разного состава**

Indices of model annual seedlings of the 2021 experiment grown on substrates of different composition

Основной компонент субстрата	Среднее значение X_{cp}	Ошибка, $\pm m$	Среднее стандартное отклонение, $\pm \sigma$	Точность опыта P , %	Коэффициент вариальности V , %	Критерий Стьюдента t_{ϕ} при $t_{05} = 2,06$
Длина корня, см						
Торф	7,2	0,50	2,22	6,9	30,8	4,79
Кокос	11,4	0,72	3,69	6,4	32,4	
Масса корня в абсолютно сухом состоянии, мг						
Торф	0,3	0,02	0,11	7,2	32,2	5,55
Кокос	0,5	0,03	0,15	5,7	28,4	
Масса надземной части в абсолютно сухом состоянии, мг						
Торф	1,1	0,09	0,41	8,3	38,8	1,01
Кокос	1,0	0,04	0,20	3,9	19,5	

Т а б л и ц а 6

Размеры однолетних сеянцев (опыт 2022 г.), выращенных на субстратах разного состава

Dimensions of annual seedlings (experiment 2022) grown on substrates of different composition

Обозначение варианта	Среднее значение X_{cp}	Ошибка, $\pm m$	Точность опыта P , %	Коэффициент вариальности V , %	Критерий Стьюдента t_{ϕ} при $t_{05} = 2,04$
Высота, см					
Т ₈ Ап ₂ -22	2,7	0,07	2,7	14,9	–
К-22	2,8	0,09	3,1	19,2	0,88
КП-22	2,8	0,06	2,2	14,1	1,08
КВ-22	3,4	0,07	2,0	15,4	7,07
Диаметр, мм					
Т ₈ Ап ₂ -22	1,7	0,06	3,4	18,1	–
К-22	1,6	0,07	4,1	22,4	1,08
КП-22	1,6	0,04	2,7	16,3	1,39
КВ-22	2,0	0,06	2,9	20,1	3,54

Т а б л и ц а 7

Высота однолетних сеянцев (опыт 2023 г.), выращенных на субстратах разного состава, см

Height of annual seedlings (experiment 2023) grown on substrates of different compositions, cm

Обозначение варианта	Среднее значение X_{cp}	Ошибка, $\pm m$	Точность опыта P , %	Коэффициент вариальности V , %	Критерий Стьюдента t_{ϕ} при $t_{05} = 2,04$
Т-23	3,3	0,12	3,5	14,1	–
К-23	3,0	0,11	3,6	15,3	1,84
Т ₃ К ₁ -23	3,0	0,11	3,5	14,9	1,84
Т ₃ П ₁ -23	2,7	0,14	5,3	20,6	3,25

фитомассы при использовании субстратов на кокосовом волокне, что, возможно, окажет существенное влияние на их дальнейшие ростовые характеристики.

3. Для составления субстратов можно использовать как традиционную составляющую — торф, так и кокосовое волокно, при условии добавления к последнему вермикулита или кедровой микоризы. Исходя из полученных нами данных, сеянцы отличаются лучшим ростом при добавле-

нии вермикулита или микоризы в равных долях с кокосовым волокном. Однако для подбора оптимального соотношения указанных элементов субстрата необходимо продолжать исследования в этом направлении.

4. Добавление перлита к торфяным смесям не оказывает положительного влияния на рост сеянцев. В ряде экспериментов, наоборот, прослеживается замедленный рост надземной части сеянцев и их корней.

Проведенные трехлетние наблюдения позволяют отметить влияние на рост сеянцев сосны кедровой сибирской не только состава субстрата, но и размера кома. Так, в опыте с использованием стаканчиков размером 200 см³ сеянцы, выращенные на контрольном торфяном субстрате, к концу вегетационного периода имели наибольшие размеры (высоту 3,8 ± 0,20 см против 2,7 ± 0,07 см и 3,3 ± 0,12 см при использовании кассет с объемом кома 85 см³ в опытах 2022–2023 гг.). Результаты исследований показывают перспективность продолжения исследований по влиянию размера кома на рост сеянцев с ЗКС.

Исследование выполнено в рамках государственного задания №FEFE-2024-0013 по заказу Министерства науки и высшего образования РФ коллективом научной лаборатории «Селекция древесных растений» по теме «Селекционно-генетические основы формирования целевых насаждений и рационального использования древесных ресурсов Красноярского края (Енисейской Сибири)»

Список литературы

- [1] Мерзленко М.Д. Актуальные аспекты искусственно-лесовосстановления // Лесной журнал, 2017. № 3. С. 22–30.
- [2] Жигунов А.В. Теория и практика выращивания посадочного материала с закрытой корневой системой для лесовосстановления. СПб.: Изд-во СПбНИИЛХ, 2000. 293 с.
- [3] Зоткина Т.А., Костырко А.Н. Выращивание посадочного материала с закрытой корневой системой: проблемы и перспективы // Лесные экосистемы: состояние, проблемы и пути их решения в современных условиях: Материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 65-летию Института лесного и лесопаркового хозяйства, Усурийск, 29 сентября 2023 г. Усурийск: Изд-во Приморского ГАТУ, 2023. С. 22–25.
- [4] Авдеева Е.А., Ровных Н.Л., Иванов Д.В., Сухенко Н.В., Кухар И.В., Калинин М.Д. Российский и мировой опыт выращивания посадочного материала с закрытой корневой системой // Хвойные бореальной зоны, 2022. Т. 40. № 4. С. 205–258.
- [5] Васильев О.И. Технологические и экономические аспекты производства посадочного материала с закрытой корневой системой // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства, 2018. № 2. С. 53–63.
- [6] Гуль Л.П. О перспективности посадочного материала с закрытыми корнями на Дальнем Востоке // Использование и воспроизводство лесных ресурсов на Дальнем Востоке. Хабаровск: Изд-во ФБУ «ДальНИИЛХ», 2016. Вып. 39. С. 215–219.
- [7] Мочалов Б.А., Чирухина Н.А. Опыт содействия естественному возобновлению лиственницы на севере европейской части России // Наука — лесному хозяйству севера. Архангельск: Изд-во СевНИИЛХ, 2019. С. 55–61.
- [8] Морковина С.С., Драпалюк М.В., Баранова Е.В. Инновационные технологии в лесокультурном деле: реальность и перспективы // Лесотехнический журнал, 2015. Т. 5. № 3 (19). С. 327–338.
- [9] Бессчетнов В.П. Морфометрические параметры сеянцев сосны с открытой и закрытой корневой системой // Вестник Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии, 2014. Т. 4. С. 52–67.
- [10] Ананьев Е.М., Залесов С.В., Луганский Н.А., Шубин Д.А., Осипенко А.Е. Опыт выращивания посадочного материала с закрытой корневой системой в Алтайском крае // Аграрный вестник Урала, 2017. № 8. (162). С. 4–9.
- [11] Хабибуллина Г.Р., Байтурина Р.Р. Практика выращивания посадочного материала с закрытой корневой системой как перспективная технология лесовосстановления // Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий: социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2023. С. 257–261.
- [12] Пастухова А.М., Войткевич А.Е. Выращивание сеянцев ЗКС лиственницы сибирской на опытных субстратах в ООО «Красноярский лесопитомник» // Леса России: политика, промышленность, наука, образование. СПб.: Изд-во СПбГЛТУ, 2023. С. 322–325.
- [13] Чичкарев А.С., Маленко А.А., Романико А.В., Леонов Е.А. Формирование лесных культур сосны на навеянных дерново-карбонатных почвах в засушливой степи // Аграрная наука — сельскому хозяйству. В 2-х кн. Барнаул: Изд-во Алтайского ГАУ, 2023. С. 48–50.
- [14] Решетникова О.В., Заречнев А.В. Особенности выращивания хвойных растений для лесовосстановления // Научные труды по агрономии, 2019. №2 (2). С. 29–37.
- [15] Белова А.И., Отрядных Т.А., Хамитов Р.С. Влияние сроков посадки на рост пятилетних культур ели европейской из сеянцев с закрытой корневой системой в южно-таежном районе Вологодской области: Практические аспекты ведения хозяйства и использования лесов. Вологда: Изд-во Вологодской ГМХА им. Н.В. Верещагина, 2023. С. 46–50.
- [16] Костин М.В. Использование посадочного материала с ЗКС при лесовосстановлении и перспектива его применения в Нижнем Поволжье // Вестник Института комплексных исследований аридных территорий, 2019. № 1(38). С. 16–20. DOI 10.24411/2071-7830-2019-10005
- [17] Жигулин Е.В. Совершенствование агротехники выращивания посадочного материала с закрытой корневой системой в теплицах с регулируемым микроклиматом: дис. ... канд. с.-х. наук, 2022. 146 с.
- [18] Диалло С.Л., Чмыр А.Ф. Перспективы выращивания сеянцев с закрытой корневой системой для аридных зон // Лесоводство, лесные культуры и почвоведение: Рациональное использование и воспроизводство лесных ресурсов. Л.: Изд-во ЛТА, 1988. С. 32–36.
- [19] Жигунов Е.В., Оплетаев А.С., Гоф А.А. Рост сеянцев при их выращивании с закрытой корневой системой // Актуальные проблемы лесного комплекса, 2019. № 55. С. 93–96.
- [20] Ананьев Е.М. Причины низкой приживаемости лесных культур, создаваемых сеянцами с закрытой корневой системой // Актуальные проблемы лесного комплекса, 2017. № 49. С. 58–62.
- [21] Гоф А.А., Жигулин Е.В., Залесов С.В., Оплетаев А.С. Опыт создания лесных культур сеянцами с закрытой корневой системой на гаях Алтайского края // Международный научно-исследовательский журнал, 2019. № 12–2(90). С. 125–130. DOI 10.23670/IRJ.2019.90.12.073
- [22] Кузьмин Э.А. Использование сеянцев и саженцев с открытой и закрытой корневой системой при создании культур кедрового корейского // Лесовосстановление на Дальнем Востоке. Хабаровск: Изд-во ДальНИИЛХ, 1980. С. 49–53.

- [23] Гуль Л.П., Лубенская В.Ф. Приживаемость и рост различных видов посадочного материала кедр и ели в опытных посадках // Лесное хозяйство в горных лесах Дальнего Востока. Хабаровск: Изд-во ДальНИИЛХ, 1982. С. 123–130.
- [24] Храмова О.Ю., Молодцов С.В. Выращивание сеянцев сосны кедровой сибирской с закрытой корневой системой в закрытом грунте Семеновского спецселекционного // Лесоводство Нижегородской области на рубеже веков. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородской ГСХА, 2004. С. 192–197.
- [25] Братилова Н.П., Матвеева Р.Н., Буторова О.Ф., Карпухина И.В., Щерба Ю.Е. Изменчивость сосны кедровой сибирской по урожайности и содержанию в семенах аминокислот // Хвойные бореальной зоны, 2016. Т. 34. № 1–2. С. 69–71.
- [26] Коновалова Д.А., Братилова Н.П., Коротков А.А. Рост и развитие сеянцев сосны кедровой сибирской с закрытой корневой системой на субстратах с разным составом // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений, 2022. Т. 25. С. 55–57.
- [27] Титов Е.В. Кедр. М.: Колос, 2007. 152 с.
- [28] Матвейчук О.С., Третьякова Р.А., Паркина О.В. Динамика развития саженцев сосны кедровой сибирской с разным типом корневой системы // Роль аграрной науки в устойчивом развитии сельских территорий: Материалы VIII Всерос. (нац.) науч. конф. с междунар. участием. Новосибирск, 20 декабря 2023 г. Новосибирск: Золотой колос, 2023. С. 85–88.
- [29] Рунова Е.М., Денисенко А.В. Некоторые особенности роста и развития сеянцев сосны сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour) в условиях теплицы // Актуальные проблемы лесного комплекса, 2022. № 62. С. 204–207.
- [30] Белых О.А., Лукиячук Л.П. Влияние синтетического стимулятора роста на развитие саженцев сосны кедровой // Балтийский морской форум: Материалы XI Междунар. Балтийского морского форума, Калининград, 25–30 сентября 2023 г. Калининград: Изд-во Калининградского ГТУ, 2023. С. 19–22.
- [31] Бородин И.И. Наиболее используемые материалы, применяемые в качестве субстратов // Агропромышленный комплекс: проблемы и перспективы развития: Материалы Всерос. науч.-практ. конф., Благовещенск, 21 апреля 2021 г. Благовещенск: Изд-во ДальГАУ, 2021. С. 18–24.
- [32] Соколовский И.В., Домасевич А.А. Изменение реакции среды сепарированного верхового торфа // Труды БГТУ, 2016. № 1. С. 144–147.
- [33] Звягинцев В.Ю., Пряничникова А.В., Никончук А.В. Перспективы использования саженцев с закрытой корневой системой // Лесозащита и комплексное использование древесины. Красноярск: Изд-во СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2020. С. 80–83.
- [34] 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. 47–76.
- [35] Бурцев Д.С. Зарубежный опыт искусственной микоризации сеянцев лесных древесных пород с закрытой корневой системой // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства, 2014. № 1. С. 47–61.
- [36] Trappe J.M. Selection of fungi for ectomycorrhizal inoculation in nurseries // Annual Review of Phytopathology, 1977, no. 15, pp. 203–222.
- [37] Bowen G.D. Mineral nutrition of ectomycorrhizae // Ectomycorrhizae, their ecology and physiology. New York: Academic Press, 1973, pp. 151–205.
- [38] Vaario L.M., Tervonen A., Haukioja K. The effect of nursery substrate and fertilization on the growth and ectomycorrhizal status of containerized and outplanted seedlings of Piceaabies // Canadian J. of Forest Research, 2009, no. 39, pp. 64–75.
- [39] Крючков С.Н., Вдовенко А.В., Зарубина А.В., Егоров С.А. Эффективность использования микоризы и полимерных материалов при выращивании сеянцев сосны в засушливых условиях // Научно-агрономический журнал, 2021. № 2 (113). С. 34–38. DOI 10.34736/FNC.2021.113.2.005.
- [40] Лобанов Н.В. Микотрофность древесных растений. М.: Лесная пром-сть, 1971. 216 с.
- [41] Графова Е.О., Гаврилова О.И., Горбач В.В. Исследование почвенных субстратов на основе отходов деревообработки для выращивания лесных сеянцев // Resources and Technology, 2023. Т. 20. № 2. С. 82–98.
- [42] Мухортов Д.И., Антропова А.В. Рост и развитие сеянцев сосны обыкновенной в контейнерах при использовании субстратов различной плотности сложения // Лесные экосистемы в условиях изменения климата, биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: Междунар. сб. науч. статей, 9 ноября 2019 г., Йошкар-Ола. Йошкар-Ола: Изд-во ПГТУ, 2019. С. 42–53.
- [43] Кузнецова Л.М., Яковлева Л.Н. Изменение физико-химических свойств торфяного тепличного грунта в процессе его использования // Труды ВНИИТП. Вып. 51. Л.: Изд-во ВНИИТП, 1983. С. 68–73.
- [44] Чернобровкина Н.П., Егорова А.В., Робонен Е.В., Нелаева К.Г. Биопрепараты из древесной зелени для выращивания сеянцев хвойных пород // X съезд общества физиологов растений России «Биология растений в эпоху глобальных изменений климата»: Всерос. науч. конф. с междунар. участием. Уфа: Изд-во Уфимского ФИЦ РАН, 2023. С. 385.
- [45] Степень Р.А., Репях С.М. Альтернативные пути рациональной переработки древесных отходов // Инвестиционный потенциал лесопромышленного комплекса Красноярского края. Красноярск: Изд-во СибГТУ, 2001. С. 239–240.
- [46] Зайцева М.И. Особенности применения порубочных остатков березы при выращивании сеянцев сосны обыкновенной // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ, 2010. № 8. С. 53–56.
- [47] Sabirzyanov I.G., Ishbirdina L.M., Muftakhova S.I., Achmadullina A.A. Intensification of cultivation of seedlings of siberian spruce (*Picea obovata* deb.) in the Southern Urals // E3S WEB of conferences. Int. Sci. Conf. «Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East» (AFE-2023). EDP Sciences, 2023, p. 02048.
- [48] Жигонов А.В., Бондаренко А.С. Комплексная оценка генотипов ели европейской для создания лесосеменных плантаций повышенной генетической ценности // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование, 2016. № 1 (29). С. 20–29.
- [49] Нелаева К.Г., Чернобровкина Н.П., Робонен Е.В., Егорова А.В. Приживаемость контейнерных сеянцев *Pinus sylvestris* L. двухротационного выращивания в Карелии // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: Материалы VIII Всерос. науч.-техн. конф. СПб.: Изд-во СПбГЛТУ, 2023. С. 304–306.
- [50] Мамаев С.А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений (на примере семейства *Pinaceae*). М.: Наука, 1973. 284 с.

Сведения об авторах

Коновалова Дарья Александровна — аспирант кафедры селекции и озеленения института лесных технологий, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», konovalova_da@sibsau.ru

Братилова Наталья Петровна — д-р с.-х. наук, профессор, заведующий кафедрой селекции и озеленения института лесных технологий, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», bratilovanp@sibsau.ru

Мантулина Алина Валерьевна — аспирант кафедры селекции и озеленения института лесных технологий, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», mantulina_av@sibsau.ru

Коротков Александр Анатольевич — канд. с.-х. наук, доцент кафедры селекции и озеленения института лесных технологий, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», korotkov_aa@sibsau.ru

Поступила в редакцию 27.03.2024.

Одобрено после рецензирования 14.06.2024.

Принята к публикации 26.08.2024.

SIBERIAN STONE PINE SEEDLINGS GROWTH WITH ROOT-BALLED TREE SYSTEM ON EXPERIMENTAL SUBSTRATES

D.A. Konovalova, **N.P. Bratilova**, **A.V. Mantulina**, **A.A. Korotkov**

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 31, av. named after newspaper «Krasnoyarskiy rabochiy», 660037, Krasnoyarsk, Russia

konovalova_da@sibsau.ru

Growth and development of annual seedlings of Siberian cedar pine (*Pinus sibirica* Du Tour) grown on mixtures using peat or coconut fiber with the addition of vermiculite, perlite in different proportions were analyzed. By the end of the first growing season (2021 year), the average weight of the above-ground part of seedlings averaged $1,1 \pm 0,03$ mg, and of roots was $0,4 \pm 0,02$ mg in the absolutely dry state. The influence of substrate composition on the growth of Siberian cedar pine seedlings with closed root system was established. Seedlings grown on pure peat overtook the seedlings of most of the used variants of mixtures in height. However, the plants grown on substrates where peat was the main component formed roots of significantly lower length and weight than on substrates based on coconut fiber. The sizes of annual seedlings in the variant with coconut fiber substrate mixed equally with vermiculite were characterized by significantly larger sizes of the above-ground parts by the end of the vegetation period compared to the peat mixture with the addition of agropelrite. Three-year observations (2021–2023 years) allow us to note the influence not only of the substrate composition, but also of the root ball size on the growth of Siberian pine seedlings. In the experiment with the use of 200 cm³ cups, seedlings grown on control peat substrate had the largest size in height by the end of the growing season than when using cassettes with a root ball volume of 85 cm³.

Keywords: Siberian stone pine (*Pinus sibirica*), seedlings with root-balled tree system, substrates, peat, coconut fiber, root ball volume

Suggested citation: Konovalova D.A., Bratilova N.P., Mantulina A.V., Korotkov A.A. *Rost seyantsev sosny kedrovoy sibirskoy s zakrytoy kornevoy sistemoy na eksperimental'nykh substratakh* [Siberian stone pine seedlings growth with root-balled tree system on experimental substrates]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 5, pp. 55–67. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-55-67

References

- [1] Merzlenko M.D. *Aktual'nye aspekty iskusstvennogo lesovosstanovleniya* [Actual aspects of artificial reforestation]. *Lesnoy zhurnal* [Forestry magazine], 2017, no. 3, pp. 22–30.
- [2] Zhigunov A.V. *Teoriya i praktika vyrashchivaniya posadochnogo materiala s zakrytoy kornevoy sistemoy dlya lesovosstanovleniya* [Theory and practice of growing planting material with a closed root system for reforestation]. St. Petersburg: St. Petersburg Research Institute of Forestry, 2000, 293 p.
- [3] Zotkina T.A., Kostyrko A.N. *Vyrashchivanie posadochnogo materiala s zakrytoy kornevoy sistemoy: problemy i perspektivy* [Growing planting material with a closed root system: problems and prospects]. *Lesnye ekosistemy: sostoyanie, problemy i puti ikh resheniya v sovremennykh usloviyakh: Mater. Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 65-letiyu Instituta lesnogo i lesoparkovogo khozyaystva* [Forest ecosystems: state, problems and ways of their solution in modern conditions: Proc. of the International scientific and practical conference dedicated to the 65th anniversary of the Institute of Forestry and Forest Park Management], Ussuriysk, September 29, 2023. Ussuriysk: Primorsky State Agrarian and Technological University, 2023, pp. 22–25.

- [4] Avdeeva E.A., Rovnykh N.L., Ivanov D.V., Sukhenko N.V., Kukhar I.V., Kalinin M.D. *Rossiyskiy i mirovoy opyt vyrashchivaniya posadochnogo materiala s zakrytoy kornevoy sistemoy* [Russian and world experience in growing planting material with a closed root system]. *Khvoynnye boreal'noy zony* [Conifers of the boreal zone], 2022, v. 40, no. 4, pp. 205–258.
- [5] Vasil'ev O.I. *Tekhnologicheskie i ekonomicheskie aspekty proizvodstva posadochnogo materiala s zakrytoy kornevoy sistemoy* [Technological and economic aspects of producing planting material with a closed root system]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva* [Transactions of the St. Petersburg Forestry Research Institute], 2018, no. 2, pp. 53–63.
- [6] Gul' L.P. *O perspektivnosti posadochnogo materiala s zakrytymi kornyami na Dal'nem Vostoke* [On the prospects of planting material with closed roots in the Far East]. *Ispol'zovanie i vosproizvodstvo lesnykh resursov na Dal'nem Vostoke* [Use and reproduction of forest resources in the Far East]. Khabarovsk: Publishing house of the Federal State Budgetary Institution «Far Research Forestry Institute», 2016, iss. 39, pp. 215–219.
- [7] Mochalov B.A., Chirukhina N.A. *Opyt sodeystviya estestvennomu vozobnovleniyu listvennitsy na severe evropeyskoy chasti Rossii* [Experience of promoting natural regeneration of larch in the north of the European part of Russia]. *Nauka — lesnomu khozyaystvu severa* [Science for northern forestry]. Arkhangel'sk: SevNIILH, 2019, pp. 55–61.
- [8] Morkovina S.S., Drapalyuk M.V., Baranova E.V. *Innovatsionnye tekhnologii v lesokul'turnom dele: real'nost' i perspektivy* [Innovative technologies in forest culture: reality and prospects]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering J.], 2015, v. 5, no. 3 (19), pp. 327–338.
- [9] Besschetnov V.P. *Morfometricheskie parametry seyantsev sosny s otkrytoy i zakrytoy kornevoy sistemoy* [Morphometric parameters of pine seedlings with open and closed root systems]. *Vestnik Nizhegorodskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* [Bulletin of the Nizhny Novgorod State Agricultural Academy], 2014, v. 4, pp. 52–67.
- [10] Anan'ev E.M., Zalesov S.V., Luganskiy N.A., Shubin D.A., Osipenko A.E. *Opyt vyrashchivaniya posadochnogo materiala s zakrytoy kornevoy sistemoy v Altayskom krae* [Experience of growing planting material with a closed root system in the Altai Territory]. *Agrarnyy vestnik Urala* [Agrarian Bulletin of the Urals], 2017, no. 8 (162), pp. 4–9.
- [11] Khabibullina G.R., Bayturina R.R. *Praktika vyrashchivaniya posadochnogo materiala s zakrytoy kornevoy sistemoy kak perspektivnaya tekhnologiya lesovosstanovleniya* [The practice of growing planting material with a closed root system as a promising technology for reforestation]. *Effektivnyy otvet na sovremennyye vyzovy s uchetoм vzaimodeystviya cheloveka i prirody, cheloveka i tekhnologii: sotsial'no-ekonomicheskie i ekologicheskie problemy lesnogo kompleksa* [An effective response to modern challenges taking into account the interaction of man and nature, man and technology: socio-economic and environmental problems of the forest complex]. Ekaterinburg: USLTU, 2023, pp. 257–261.
- [12] Pastukhova A.M., Voytkovich A.E. *Vyrashchivanie seyantsev ZKS listvennitsy sibirskoy na opytnykh substratakh v OOO «Krasnoyarskiy lesopitomnik»* [Growing seedlings of Siberian larch in closed root systems on experimental substrates in Krasnoyarsk Forest Nursery LLC]. *Lesa Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie* [Russian Forests: Policy, Industry, Science, Education]. St. Petersburg: SPbGLTU, 2023, pp. 322–325.
- [13] Chichkarev A.S., Malenko A.A., Romaniko A.V., Leonov E.A. *Formirovaniye lesnykh kul'tur sosny na naveyannykh dernovo-karbonatnykh pochvakh v zasushlivoy stepi* [Formation of pine forest crops on induced sod-carbonate soils in arid steppe]. *Agrarnaya nauka — sel'skomu khozyaystvu* [Agrarian science for agriculture], in 2 books. Barnaul: Altai State Agrarian University, 2023, pp. 48–50.
- [14] Reshetnikova O.V., Zarechnev A.V. *Osobennosti vyrashchivaniya khvoynnykh rasteniy dlya lesovosstanovleniya* [Features of growing conifers for reforestation]. *Nauchnye trudy po agronomii* [Scientific works on agronomy], 2019, no. 2 (2), pp. 29–37.
- [15] Belova A.I., Otradnykh T.A., Khamitov R.S. *Vliyaniye srokov posadki na rost pyatiletnikh kul'tur eli evropeyskoy iz seyantsev s zakrytoy kornevoy sistemoy v yuzhno-taеzhnom rayone Vologodskoy oblasti: Prakticheskie aspekty vedeniya khozyaystva i ispol'zovaniya lesov* [Effect of planting timing on the growth of five-year-old European spruce crops from closed root system seedlings in the southern taiga region of the Vologda Oblast: Practical aspects of forest management and use]. Vologda: Vologda State Dairy Farming Academy named after N.V. Vereshchagin, 2023, pp. 46–50.
- [16] Kostin M.V. *Ispol'zovanie posadochnogo materiala s ZKS pri lesovosstanovlenii i perspektiva ego primeneniya v Nizhnem Povolzh'e* [Use of closed root system planting material in forest restoration and the prospects for its application in the Lower Volga region]. *Vestnik Instituta kompleksnykh issledovaniy aridnykh territoriy* [Bulletin of the Institute for Comprehensive Research of Arid Territories], 2019, no. 1(38), pp. 16–20. DOI 10.24411/2071-7830-2019-10005
- [17] Zhigulin E.V. *Sovershenstvovaniye agrotekhniki vyrashchivaniya posadochnogo materiala s zakrytoy kornevoy sistemoy v teplitsakh s reguliruemyim mikroklimatom* [Improving the agricultural technology of growing planting material with a closed root system in greenhouses with a controlled microclimate]. *Diss. Cand. Sci. (Agric.)*, 2022, 146 p.
- [18] Diallo S.L., Chmyr A.F. *Perspektivy vyrashchivaniya seyantsev s zakrytoy kornevoy sistemoy dlya aridnykh zon* [Prospects for growing seedlings with a closed root system for arid zones]. *Lesovodstvo, lesnye kul'tury i pochvovedeniye: Ratsional'noe ispol'zovanie i vosproizvodstvo lesnykh resursov* [Forestry, forest crops and soil science: Rational use and reproduction of forest resources]. Leningrad: LTA, 1988, pp. 32–36.
- [19] Zhigunov E.V., Opletaev A.S., Gof A.A. *Rost seyantsev pri ikh vyrashchivanii s zakrytoy kornevoy sistemoy* [Growth of seedlings when growing them with a closed root system]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex], 2019, no. 55, pp. 93–96.
- [20] Anan'ev E.M. *Prichiny nizkoy prizhivaemosti lesnykh kul'tur, sozdavaemykh seyantsami s zakrytoy kornevoy sistemoy* [Reasons for the low survival rate of forest crops created by seedlings with a closed root system]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex], 2017, no. 49, pp. 58–62.
- [21] Gof A.A., Zhigulin E.V., Zalesov S.V., Opletaev A.S. *Opyt sozdaniya lesnykh kul'tur seyantsami s zakrytoy kornevoy sistemoy na garyakh Altayskogo kraya* [Experience of creating forest crops by seedlings with a closed root system on burnt-out areas of the Altai Territory]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research Journal], 2019, no. 12–2(90), pp. 125–130. DOI 10.23670/IRJ.2019.90.12.073
- [22] Kuz'min E.A. *Ispol'zovanie seyantsev i sazhenitsev s otkrytoy i zakrytoy kornevoy sistemoy pri sozdanii kul'tur kedra koreyskogo* [Use of seedlings and saplings with open and closed root systems in creating Korean cedar crops]. *Lesovosstanovleniye na Dal'nem Vostoke* [Reforestation in the Far East]. Khabarovsk: DalNIILH, 1980, pp. 49–53.

- [23] Gul' L.P., Lubenskaya V.F. *Prizhivaemost' i rost razlichnykh vidov posadochnogo materiala kedra i eli v opytnykh posadkakh* [Survival and growth of various types of cedar and spruce planting material in experimental plantings]. *Lesnoe khozyaystvo v gornykh lesakh Dal'nego Vostoka* [Forestry in the mountain forests of the Far East]. Khabarovsk: DalNIILH, 1982, pp. 123–130.
- [24] Khranova O. Yu., Molodtsov S.V. *Vyrashchivanie seyantsev sosny kedrovoy sibirskoy s zakrytoy kornevoy sistemoy v zakrytom grunte Semenovskogo spetssemleskhoza* [Growing Siberian cedar pine seedlings with a closed root system in closed ground of the Semenovsky special forestry enterprise]. *Lesovodstvo Nizhegorodskoy oblasti na rubezhe vekov* [Forestry of the Nizhny Novgorod region at the turn of the century]. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, 2004, pp. 192–197.
- [25] Bratilova N.P., Matveeva R.N., Butorova O.F., Karpukhina I.V., Shcherba Yu.E. *Izmenchivost' sosny kedrovoy sibirskoy po urozhaynosti i sodержaniyu v semenakh aminokislot* [Variability of Siberian cedar pine in yield and amino acid content in seeds]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Conifers of the boreal zone], 2016, v. 34, no. 1–2, pp. 69–71.
- [26] Konovalova D.A., Bratilova N.P., Korotkov A.A. *Rost i razvitie seyantsev sosny kedrovoy sibirskoy s zakrytoy kornevoy sistemoy na substratakh s raznym sostavom* [Growth and development of Siberian cedar pine seedlings with a closed root system on substrates with different compositions]. *Plodovodstvo, semenovodstvo, introduktsiya drevesnykh rasteniy* [Fruit growing, seed production, introduction of woody plants], 2022, v. 25, pp. 55–57.
- [27] Titov E.V. *Kedr* [Cedar]. Moscow: Kolos, 2007, 152 p.
- [28] Matveychuk O.S., Tret'yakova R.A., Parkina O.V. *Dinamika razvitiya sazhentsev sosny kedrovoy sibirskoy s raznym tipom kornevoy sistemy* [Dynamics of development of Siberian cedar pine seedlings with different types of root system]. *Rol' agrarnoy nauki v ustoychivom razvitii sel'skikh territoriy: Mater. VIII Vseros. (natsional'noy) nauch. konf. s mezhdunar. uchastiem* [The role of agricultural science in sustainable development of rural areas: Proc. VIII All-Russian (national) scientific conf. with international. participation]. Novosibirsk, December 20, 2023. Novosibirsk: Golden Ear, 2023, pp. 85–88.
- [29] Runova E.M., Denisenko A.V. *Nekotorye osobennosti rosta i razvitiya seyantsev sosny sibirskoy (Pinus sibirica Du Tour) v usloviyakh teplitsy* [Some features of growth and development of Siberian pine seedlings (*Pinus sibirica* Du Tour) in greenhouse conditions]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex], 2022, no. 62, pp. 204–207.
- [30] Belykh O.A., Lukiyanchuk L.P. *Vliyaniye sinteticheskogo stimulyatora rosta na razvitie sazhentsev sosny kedrovoy* [Effect of synthetic growth stimulator on development of Siberian pine seedlings]. *Baltiyskiy morskoy forum: Mater. XI Mezhdunar. Baltiyskogo morskogo foruma* [Baltic Marine Forum: Proc. of the XI International Baltic Marine Forum], Kaliningrad, September 25–30, 2023. Kaliningrad: Kaliningrad State Technical University, 2023, pp. 19–22.
- [31] Borodin I.I. *Naibolee ispol'zuemye materialy, primenyaemye v kachestve substratov* [The most commonly used materials used as substrates]. *Agropromyshlenny kompleks: problemy i perspektivy razvitiya: Mater. Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Agro-industrial complex: problems and development prospects: Proc. of the All-Russian scientific and practical conference], Blagoveshchensk, April 21, 2021. Blagoveshchensk: Far Eastern State Agrarian University, 2021, pp. 18–24.
- [32] Sokolovskiy I.V., Domasevich A.A. *Izmenenie reaktivnosti sredy separirovannogo verkhovogo torfa* [Changing the reaction of the separated high-moor peat environment]. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 1, pp. 144–147.
- [33] Zvyagintsev V.Yu., Pryanichnikov A.V., Nikonchuk A.V. *Perspektivy ispol'zovaniya sazhentsev s zakrytoy kornevoy sistemoy* [Prospects for using seedlings with a closed root system]. *Lesoekspluatatsiya i kompleksnoe ispol'zovanie drevesiny* [Forest exploitation and complex use of wood]. Krasnoyarsk: Siberian State University named after M.F. Reshetnev, 2020, pp. 80–83.
- [34] 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. Al'ternativy torfu* [Experience in the development and use of container substrates for forest nurseries. Alternatives to peat]. *Resources and Technology* [Resources and Technology], 2015, v. 12, no. 1, pp. 47–76.
- [35] Burtsev D.S. *Zarubezhnyy opyt iskusstvennoy mikorizatsii seyantsev lesnykh drevesnykh porod s zakrytoy kornevoy sistemoy* [Foreign experience of artificial mycorrhization of seedlings of forest tree species with a closed root system]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva* [Transactions of the St. Petersburg Research Institute of Forestry], 2014, no. 1, pp. 47–61.
- [36] Trappe J.M. Selection of fungi for ectomycorrhizal inoculation in nurseries. *Annual Review of Phytopathology*, 1977, no. 15, pp. 203–222.
- [37] Bowen G.D. Mineral nutrition of ectomycorrhizae. *Ectomycorrhizae, their ecology and physiology*. New York: Academic Press, 1973, pp. 151–205.
- [38] Vaario L.M., Tervonen A., Haukioja K. The effect of nursery substrate and fertilization on the growth and ectomycorrhizal status of containerized and outplanted seedlings of *Picea abies*. *Canadian J. of Forest Research*, 2009, no. 39, pp. 64–75.
- [39] Kryuchkov S.N., Vdovenko A.V., Zarubina A.V., Egorov S.A. *Effektivnost' ispol'zovaniya mikorizy i polimernykh materialov pri vyrashchivaniy seyantsev sosny v zasushlivykh usloviyakh* [Efficiency of using mycorrhiza and polymeric materials in growing pine seedlings in dry conditions]. *Nauchno-agronomicheskii zhurnal* [Scientific and Agronomic J.], 2021, no. 2 (113), pp. 34–38. DOI 10.34736/FNC.2021.113.2.005
- [40] Lobanov N.V. *Mikotrofnost' drevesnykh rasteniy* [Mycotrophy of woody plants]. Moscow: Lesnaya Promyshlennost, 1971, 216 p.
- [41] Grafova E.O., Gavrilo O.I., Gorbach V.V. *Issledovanie pochvennykh substratov na osnove otkhodov derevoobrabotki dlya vyrashchivaniya lesnykh seyantsev* [Study of soil substrates based on wood processing waste for growing forest seedlings]. *Resources and Technology* [Resources and Technology], 2023, v. 20, no. 2, pp. 82–98.
- [42] Mukhortov D.I., Antropova A.V. *Rost i razvitie seyantsev sosny obyknovennoy v konteynerakh pri ispol'zovanii substratov razlichnoy plotnosti slozheniya* [Growth and development of Scots pine seedlings in containers using substrates of different bulk densities]. *Lesnye ekosistemy v usloviyakh izmeneniya klimata, biologicheskaya produktivnost' i distantsionnyy monitoring: Mezhdunarodnyy sbornik nauchnykh statey* [Forest ecosystems in the context of climate change, biological productivity and remote monitoring: International collection of scientific articles], November 9, 2019, Yoshkar-Ola. Yoshkar-Ola: PSTU, 2019, pp. 42–53.

- [43] Kuznetsova L.M., Yakovleva L.N. *Izmenenie fiziko-khimicheskikh svoystv torfyanogo teplichnogo grunta v protsesse ego ispol'zovaniya* [Changes in the physicochemical properties of peat greenhouse soil during its use]. Trudy VNIITP [Proceedings of VNIITP], iss. 51. Leningrad: VNIITP, 1983, pp. 68–73.
- [44] Chernobrovkina N.P., Egorova A.V., Robonen E.V., Nelaeva K.G. *Biopreparaty iz drevesnoy zeleni dlya vyrashchivaniya seyantsev khvoynykh porod* [Biopreparations from wood greenery for growing coniferous seedlings]. X S'ezd obshchestva fiziologov rasteniy Rossii «Biologiya rasteniy v epokhu global'nykh izmeneniy klimata»: Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem [X Congress of the Society of Plant Physiologists of Russia «Plant Biology in the Era of Global Climate Change»: All-Russian scientific conference with international participation]. Ufa: Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 2023, p. 385.
- [45] Stepen' R.A., Repyakh S.M. *Alternativnye puti ratsional'noy pererabotki drevesnykh otkhodov* [Alternative ways of rational processing of wood waste]. Investitsionnyy potentsial lesopromyshlennogo kompleksa Krasnoyarskogo kraia [Investment potential of the forestry complex of Krasnoyarsk Krai]. Krasnoyarsk: SibSTU, 2001, pp. 239–240.
- [46] Zaytseva M.I. *Osobennosti primeneniya porubochnykh ostatkov berezy pri vyrashchivanii seyantsev sosny obyknovennoy* [Features of the use of birch logging residues in growing Scots pine seedlings]. Trudy lesoinzhenernogo fakul'teta PetrGU [Proceedings of the Forest Engineering Faculty of PetrSU], 2010, no. 8, pp. 53–56.
- [47] Sabirzyanov I.G., Ishbirdina L.M., Muftakhova S.I., Achmadullina A.A. Intensification of cultivation of seedlings of Siberian spruce (*Picea obovata* ledeb.) in the Southern Urals. E3S WEB of conferences. International Scientific Conference «Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East» (AFE–2023). EDP Sciences, 2023, p. 02048.
- [48] Zhigunov A.V., Bondarenko A.S. *Kompleksnaya otsenka genotipov eli evropeyskoy dlya sozdaniya lesesemennykh plantatsiy povyshennoy geneticheskoy tsennosti* [Comprehensive assessment of Norway spruce genotypes for the creation of forest seed plantations of increased genetic value]. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie [Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Forest. Ecology. Nature Management], 2016, no. 1 (29), pp. 20–29.
- [49] Nelaeva K.G., Chernobrovkina N.P., Robonen E.V., Egorova A.V. *Prizhivaemost' konteynernykh seyantsev Pinus sylvestris L. dvukhrotatsionnogo vyrashchivaniya v Karelii* [Survival of container seedlings of *Pinus sylvestris* L. grown in two rotations in Karelia]. Lesa Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie: Mater. VIII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Forests of Russia: policy, industry, science, education: Proc. of the VIII All-Russian scientific and technical conference]. St. Petersburg: SPbGLTU, 2023, pp. 304–306.
- [50] Mamaev S.A. *Formy vnutrividovoy izmenchivosti drevesnykh rasteniy (na primere semeystva Pinaceae)* [Forms of intraspecific variability of woody plants (using the Pinaceae family as an example)]. Moscow: Nauka, 1973, 284 p.

The research was carried out within the framework of the state assignment №FEFE-2024-0013 by the order of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation by the team of the scientific laboratory «Selection of woody plants» on the theme «Selection and genetic bases of formation of target plantations and rational use of woody resources of the Krasnoyarsk region (Yenisei Siberia)»

Authors' information

Konovalova Dar'ya Aleksandrovna [✉] — pg. of the Department of Breeding and Landscaping of the Institute of Forest Technologies, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, konovalova_da@sibsau.ru

Bratilova Natal'ya Petrovna — Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Head of the Department of Breeding and Landscaping at the Institute of Forest Technologies, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, bratilovanp@sibsau.ru

Mantulina Alina Valer'evna — pg. of the Department of Breeding and Landscaping of the Institute of Forest Technologies, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, mantulina_av@sibsau.ru

Korotkov Aleksandr Anatol'evich — Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor of the Department of Breeding and Landscaping of the Institute of Forest Technologies, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, korotkov_aa@sibsau.ru

Received 27.03.2024.

Approved after review 14.06.2024.

Accepted for publication 26.08.2024.

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

РОСТ, ПРОДУКТИВНОСТЬ И СОХРАННОСТЬ КЛИМАТИПОВ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ (*PINUS SYLVESTRIS* L.) В УСЛОВИЯХ МЕЩЁРСКОЙ НИЗМЕННОСТИ

П.Г. Мельник

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

melnik_petr@bk.ru

Приведены результаты выращивания климатипов сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в Авснюнинском участковом лесничестве, расположенном на территории Мещёрской низменности в восточной части Московской области. Представленный спектр испытываемых провениенций довольно широк и в меридианном направлении охватывает ареал рода *Pinus* от Прибалтики (Литва, Эстония) до Хабаровского края (Дальний Восток, Россия). Установлено, что по высоте лидируют лесостепные климатипы тульский (24,2 м), сумской (24,1 м) и винницкий (24,1 м), растущие, как и местная сосна по Iб классу бонитета. Определен средний диаметр ствола сосны. Зафиксирован наилучший результат у винницкого, сыктывкарского, сумского и мордовского (22,5...25,5 см) климатипов. Установлен высокий запас стволовой древесины у климатипов из Хмельницкой, Ровенской, Винницкой, Львовской областей Украины, Орловской, Воронежской и Курской областей России, превышающие по этому показателю процент относительно контроля (Московская область — 400 м³/га — 100 %) на 112...130 %. Для лидирующих по запасу стволовой древесины провениенций зафиксирован также и высокий средний прирост по запасу 9,6...11,1 м³ на участке за год. Дана оценка лесоводственного эффекта по комплексному показателю целесообразности внедрения конкретных провениенций сосны. Определены перспективные климатипы сосны обыкновенной как в России, так и за рубежом.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, климатип, географические лесные культуры, лесоводственный эффект, Мещёрская низменность

Ссылка для цитирования: Мельник П.Г. Рост, продуктивность и сохранность климатипов сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях Мещёрской низменности // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 5. С. 68–82. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-68-82

Для повышения продуктивности лесов существенное значение имеет использование современных методов селекции при подборе высококачественных лесных семян, что при надлежащем уровне агротехники и соответствующем уходе за лесными культурами гарантирует высокую продуктивность насаждений и хорошее качество древесины. Создание географических культур является одним из основных приемов лесной селекции, который учитывает наследственные особенности географического и экологического происхождения древесных растений [1].

Основные лесообразующие породы России, представленные елью, сосной и лиственницей, имеют обширные ареалы естественного распространения. В ареалах хвойным породам свойственна генетическая изменчивость, обусловленная географическим фактором, поэтому необходимо изучение их генетического потенциала, инвентаризация огромных запасов форм с помощью метода дифференциальной систематики и географии [2].

До середины XIX в. в России при оценке качества семян важное значение придавали всхоже-

сти и энергии прорастания, причем независимо от их происхождения. Игнорирование сведений о происхождении семенного материала приводило к многочисленным неудачам при искусственном лесовосстановлении. Особо заметно это стало проявляться в последней четверти XIX в., когда при резко увеличившемся объеме лесокультурных работ возник недостаток в семенах местного происхождения. Это обусловило ввоз семян из-за границы, в частности семена сосны поставлялись в Россию в основном немецкой фирмой «Генрих Келлер в Дармштадте», а в Москве в массе торговали семенами ели из Норвегии [1]. В результате выращенные из дармштадских семян сосны оказались кривоствольными и во всех отношениях хуже тех, которые были получены из местных семян (рис. 1).

Потерпев ряд крупных неудач, лесоводы не только России, но и некоторых стран Европы приступили к созданию сети географических культур, позволяющей выбрать наиболее высокопродуктивные и устойчивые климатические формы древесных пород, а также зафиксировать приемлемые расстояния по дальности переброски лесосеменного материала [1].



Рис. 1. Сосна «дармштадского» происхождения в ближней части Никольской лесной дачи. Фото автора, 10.02.2024 г.

Fig. 1. Pine of «Darmstadt» origin in the near part of Nikolskaya lesnaya dacha. Photo by the author, 10.02.2024

Первые опыты с географическими культурами сосны обыкновенной были начаты в России в Подмосковье еще в 1877 г. проф. М.К. Турским на Лесной опытной даче Петровской земледельческой и лесной академии (ныне Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева) (рис. 2).

В 1883–1897 гг. Митрофаном Кузьмичем Турским была заложена серия опытов по географии сосны главным образом западноевропейского происхождения [3]. По многим теоретическим и экспериментальным направлениям М.К. Турский был первопроходцем, опередившим западных лесоводов. В этом заключается его предвидение задач и явный приоритет в области лесного опытного дела, что было подмечено еще корифеем лесоводственной науки общемировой значимости Г.Ф. Морозовым (1867–1920), который в 1912 г. писал, что «Европа справедливо гордится теперь вероятно уже 15-летними опытами Cieslar’a относительно влияния происхождения семян на рост и другие особенности насаждений. Опыты нашего Митрофана Кузьмича гораздо старше — им теперь уже 25–30 лет, т. е. поставлены они были тогда, когда в Германии никто или почти никто, по крайней мере, в лесоводственных кругах, не думал об экспериментальном разрешении подобных вопросов» [4]. Приемником опытов проф. М.К. Турского по изучению географической изменчивости основных лесообразующих пород на Лесной опытной даче Петровской



Рис. 2. Митрофан Кузьмич Турский (1840–1899) — основоположник изучения географической изменчивости основных лесообразующих пород

Fig. 2. Mitrofan Kuzmich Tursky (1840–1899) — the founder of the study of geographical variability of the main forest-forming species

академии становится его ученик, Николай Степанович Нестеров (1860–1926), который с 1902 по 1911 гг. создал новую серию опытов с географическими посадками сосны обыкновенной, а в 1916 и 1917 гг. заложил географические культуры ели из 18 пунктов Европейской России [5].

В период с 1910 по 1916 гг. по инициативе и под руководством основоположника лесного опытного дела В.Д. Огиевского (1861–1921) на территории европейской части России была создана обширная система географических культур сосны обыкновенной и заложено несколько опытных участков с лиственницей и дубом. Необходимость в них В.Д. Огиевский понял задолго до того, как представилась возможность осуществить на практике эту идею, когда в 1909 г. его назначили заведующим Центральной Контрольной и Опытной Станцией древесных семян при Лесном Департаменте. Так, в июне 1898 г. на IX Всероссийском лесохозяйственном съезде в Самаре он заявил: «...интересно сравнить различия качества сеянцев не от величины семян, а от различия местностей, откуда семена взяты, например, в Тульской губернии семена могут быть из Костромской или Харьковской губерний. Важно выяснить разницу, которая окажется в саженцах, полученных от таких семян, взятых из различных местностей. Этим вопросом заинтересованы и за границей — на австрийских и швейцарских опытных станциях производятся соответствующие опыты. К нам неприменимы их результаты, потому что там не может быть такой огромной разницы в условиях местности, таких изменений температуры, какие наблюдаются у нас» [6].

Под личным руководством В.Д. Огиевского были начаты работы, связанные с изучением значения происхождения семян в Собичском, Никольском и Охтинском лесничествах, а также в парке Императорского лесного института. Кроме того, семена сосны, предназначенные для закладки географических культур, были направлены еще в 18 пунктов европейской части России, охвативших территории нынешних России, Белоруссии, Польши и Украины [1].

В 1928–1930 гг. под руководством заведующего лесокультурным отделом Всеукраинского центрального управления лесами Наркомзема УССР В.Я. Гурского (1874–1934) и заместителя директора УкрНИИЛХа А.Б. Жукова (1901–1979) по инициативе и методике проф. А.И. Колесникова (1888–1972) создаются ценные и крупные географические культуры сосны обыкновенной в Сумской области на Красно-Тростянецкой лесной опытной станции. Занимаемая площадь культур составила 18,8 га. Семена сосны здесь представлены из 244 пунктов, которые отражают основные районы ее произрастания в европей-

ской части бывшего СССР, в том числе Украины, Белоруссии, Урала, Казахстана, а также Сибири и Дальнего Востока России.

В середине XX в. в связи с возникшим дефицитом проверенных семян и случаями гибели насаждений сосны, созданных из непроверенного посадочного материала, возникла необходимость проведения специальных исследований по выявлению новых возможных районов получения семян. В Московской области для решения этих вопросов были заложены географические культуры сосны: в 1948–1950 гг. в Серебряноборском опытном лесничестве Института леса АН СССР [7]; в 1957 и в 1964 гг. — в Щелковском учебно-опытном лесхозе [8].

В 1959 г. под руководством заведующего кафедрой генетики и селекции Воронежского лесотехнического института М.М. Вересина созданы крупнейшие в России и мире географические культуры сосны в Воронежском и Учебно-опытном лесхозах на площади 37,6 га из семян разного географического происхождения (353 образца), полученных от сети лесных контрольно-семенных станций СССР [9].

Большой объем по созданию географических культур сосны обыкновенной выполнен в 1962 и 1966 гг. под руководством сотрудника ВНИИЛМ канд. с.-х. наук Е.П. Проказина в условиях Мещёрской низменности [10].

Большая значимость для экономики страны географических посадок, обусловила издание Гослесхозом СССР в 1973 г. приказа № 29 «О создании Государственной сети географических культур основных лесобразующих пород и уточнении лесосеменного районирования», а также были разработаны программа и методические рекомендации, утвержденные Проблемным советом по лесной генетике, селекции и семеноводству [11]. В период с 1973 по 1978 гг. по указанной методике был проведен уникальный не имеющий аналогов в мировой практике эксперимент по созданию сети географических культур основных лесобразующих пород — сосны, ели, дуба, лиственницы, кедра, пихты, охватывающий все лесорастительные районы страны. Всего было создано 1236 га географических лесных культур в 111 пунктах страны. В начале XXI в. в России сохранился 71 участок географических культур указанных пород при их общей площади 793,9 га [12].

В результате проведенных в 1976–1980 гг. работ по анализу и обобщению итогов реализации государственной программы по закладке сети географических лесных культур было подготовлено «Лесосеменное районирование основных лесобразующих пород СССР», которое утверждено приказом Государственного комитета СССР по лесному хозяйству № 181 от 18 ноября 1980 г. и

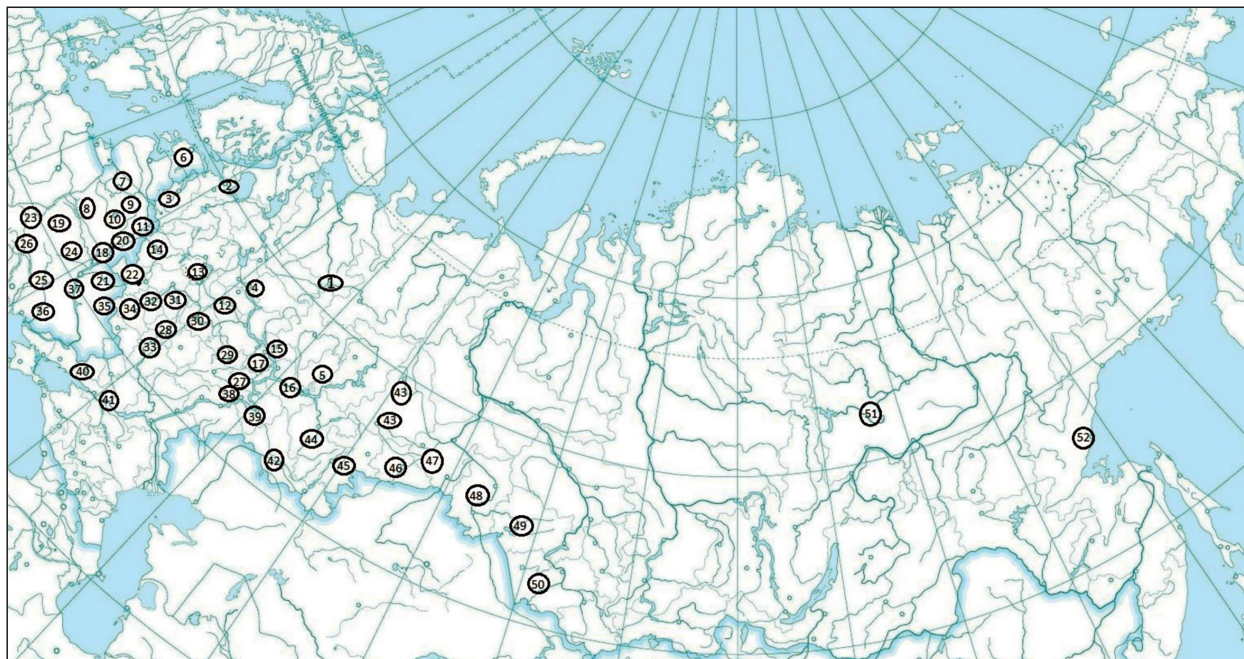


Рис. 3. Географическое происхождение климатипов сосны в географических культурах Авсюнинского лесничества (номера климатипов соответствуют табл. 1)

Fig. 3. Geographical origin of pine climatypes in geographical species of Avsyuninsky forestry (numbers of climatypes correspond to Table 1)

введено в действие с 1 июля 1982 г., что являлось важнейшей составной частью общей программы генетического улучшения лесов [13].

Богатому отечественному эксперименту по изучению географических лесных культур сосны посвящены работы С.А. Самофала [14], Н.П. Кобранова [15], Н.С. Нестерова [3], В.М. Обновленского [16], М.М. Вересина [17], Л.Ф. Правдина [18], А.С. Яблокова [19], П.И. Войчала [20] и др.

В некоторых более поздних публикациях основное внимание при изучении географической изменчивости сосны обыкновенной уделено в основном сохранности [21], росту [21, 22], продуктивности [21–23], радиальному приросту [24], качеству древесины [25], устойчивости к периодическим колебаниям климата [26, 27], репродуктивному потенциалу [28], грибным болезням [29], филогеографии популяций [30] и другим признакам. Однако до настоящего времени недостаточно работ, посвященных росту, продуктивности и сохранности различных географических провениенций сосны обыкновенной в фазе формирования стволов.

Цель работы

Цель работы — сравнительное изучение особенностей роста, продуктивности и сохранности климатипов сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях Мещёрской низменности на основании изучения широкого Евразийского ареала происхождений.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являются географические лесные культуры сосны обыкновенной, заложенные Всесоюзной лесосеменной станцией весной 1966 г. в Авсюнинском лесничестве Куровского мехлесхоза Московского управления лесного хозяйства на площади 10,49 га, вышедшей из-под сельскохозяйственного пользования. Технология создания культур: нарезка борозд плугом ПКЛ-70 на расстоянии 1,5 м между центрами борозд. Посадка осуществлялась вручную под меч Колесова в пласт с шагом посадки 1 м, густота посадки 6,7 тыс. шт./га. Дополнения в географических культурах не проводили. На опытном участке преобладает дерново-среднеподзолистая супесчаная почва на древнеаллювиальных отложениях. Тип условий местопроисрастания — суборь свежая В₂, микрорельеф — волнистый, ровный. Всего было высажено 52 климатипа (79 экотипов) (часть вариантов высажена в 2–4 кратной повторности) охватывающих практически весь ареал рода *Pinus* от Прибалтики, Белоруссии, Украины до Якутии и Дальнего Востока (рис. 3). В табл. 1 приведены сведения о географическом происхождении семенного материала в разрезе лесосеменных районов и подрайонов [13].

Начальные фазы роста географических экотипов изучены А.Е. Проказиным и подробно изложены в его кандидатской диссертации [10], а также исследовались С.В. Савосько [31].

**Информация о материнских насаждениях сосны обыкновенной
в географических посадках Авсюнинского лесничества**

**Information on mother plantations of common pine
in geographical plantations of Avsiuninsky forestry**

Номер климатического типа	Номер экотипа	Регион, климатический тип	Лесосеменной район	Лесосеменной подрайон
1	6	Республика Коми, Сыктывкарский	6. Верхнедвинский	б. Вычегодский
2	36	Ленинградская обл., Сиверский	7. Северо-Западный	а. Ленинградский
3	60	Псковская обл., Опочецкий		б. Псковско-Новгородский
4	24	Костромская обл., Костромской	8. Сухоно-Унженский	б. Костромской
5	64	Удмуртская Республика, Воткинский	9. Вятский	б. Удмуртский
6	43	Эстония, Вырусский	11. Эстонский	б. Континентальный
7	63	Литва, Тракайский	13. Литовский	в. Юго-Восточный
8	68	Гродненская обл., Волковысский	15. Белорусский	б. Центральный
9	17	Витебская обл., Россонский		а. Северный
10	70	Минская обл., Узденский		б. Центральный
11	73	Могилёвская обл., Быховский		
12	71	Владимирская обл., Ковровский	17. Центральный	б. Московский
13	16	Московская обл., Куровской (контроль)		
14	25	Смоленская обл., Ярцевский	16. Верхнеднепровский	
15	39	Республика Марий Эл, Звениговский	18. Приволжский	а. Марийский
16	67	Республика Татарстан, Камский	21. Средне-Волжский	а. Пензенско-Ульяновский
17	19	Чувашская Республика, Алатырский	18. Приволжский	б. Мордовско-Чувашский
18	32	Брестская обл., Пружанский	19. Полесский	а. Брестский
19	28	Волынская обл., Цуманский		в. Волынско-Житомирский
20	4	Гомельская обл., Гомельский		б. Гомельский
21	74	Черниговская обл., Остёрский		г. Киевско-Черниговский
22	51	Брянская обл., Гаваньский	16. Верхнеднепровский	
23	37	Львовская обл., Радеховский	19. Полесский	в. Волынско-Житомирский
24	41	Ровенская обл., Острожский		
25	53	Хмельницкая обл., Славуцкий		
26	69	Тернопольская обл., Кременецкий	25. Днепровский правобережный лесостепной	
27	22	Пензенская обл., Лунинский	21. Средне-Волжский	а. Пензенско-Ульяновский
28	9	Липецкая обл., Ленинский	20. Центрально-Черноземный	б. Воронежско-Гамбовский
29	15	Республика Мордовия, Темниковский	18. Приволжский	б. Мордовско-Чувашский
30	34	Рязанская обл., Солотчинский	17. Центральный	в. Верхнеокский
31	55	Тульская обл., Заокский		
32	29	Орловская обл., Знаменский	20. Центрально-Черноземный	а. Курско-Белгородский
33	61	Воронежская обл., Воронежский		б. Воронежско-Гамбовский
34	78	Курская обл., Хомутовский		а. Курско-Белгородский
35	27	Сумская обл., Шосткинский	19. Полесский	г. Киевско-Черниговский
36	45	Винницкая обл., Бершадский	25. Днепровский правобережный лесостепной	
37	35	Черкасская обл., Черкасский		
38	47	Ульяновская обл., Старомайский	21. Средне-Волжский	б. Заволжский
39	31	Самарская обл., Новобуянский		
40	2	Донецкая обл., Славянский	33и. Украинский степной	в. Восточный
41	59	Ростовская обл., Городищенский	34и. Нижнедонской	
42	75	Оренбургская обл., Кваркенский	68. Зауральский степной	
43	12	Свердловская обл., Серовский	53. Среднезауральский	б. Равнинный
	80	Свердловская обл., Алапаевский		

Окончание табл. 1

Номер климатипа	Номер экотипа	Регион, климатип	Лесосеменной район	Лесосеменной подрайон
44	42	Республика Башкортостан, Белорецкий	22. Южноуральский	в. Горнолесной восточный
45	30	Челябинская обл., Юрюзанский		б. Горнолесной западный
46	58	Курганская обл., Мехонский	67. Зауральский лесостепной	
47	8	Тюменская обл., Тобольский	53. Среднезауральский	б. Равнинный
48	11	Омская обл., Подгородный	54. Прииртышский	в. Тарский
49	76	Новосибирская обл., Сузунский	69. Верхнеобский	а. Присалаирский
50	38	Алтайский край, Петровский		
51	26	Республика Саха (Якутия), Олекминский	50. Центрально-Якутский	а. Наманский
52	27	Хабаровский край, Аянский	52. Алдано-Майский	б. Майско-Юдомский

Примечание. Здесь и далее названия климатипов даны в соответствии с актуальными названиями на год закладки географических культур.

По достижению каждого экотипа сосны 47-летнего возраста была выполнена инструментальная таксация на пробных площадях в соответствии с ОСТ 56-69–83 [32]. Из всего спектра представленных в географических культурах экотипов, в 2013 г. было выполнено обследование на общей площади 10,49 га и проведен сплошной пересчет на 80 постоянных пробных площадях по общепринятым в лесной таксации методикам [33]. Географический спектр испытанных в лесных культурах Авсюнинского лесничества климатипов сосны обыкновенной показан на рис. 3.

Для объективной оценки использования семенного материала конкретных испытываемых провениенций сосны обыкновенной рассчитывался обобщенный относительный показатель, выраженный в единицах (долях) стандартного отклонения. Такое методическое решение широко используется зарубежными учеными [34–36]. Однако в отличие от их подхода, когда в качестве исходного показателя берется только средняя высота, нами в долях стандартного отклонения дополнительно оценивались средние диаметры провениенций и запасы стволовой древесины. Подробно методика расчетов изложена для географических культур сосны обыкновенной и лиственницы в работе [37].

Результаты и обсуждение

На момент нашего последнего обследования этих посадок возраст лесных культур составил 47 лет (биологический возраст сосны 49 лет). В этом возрасте географические культуры сосны по своему развитию находятся на завершающей стадии фазы формирования стволов [38]. Начало этой фазы характеризуется завершением отпада (особенно сильного в перегущенных насаждениях) и дальнейшим интенсивным накоплением запаса. В этот период по всей образующей ствола

идет активная работа камбия. Завершение фазы совпадает с ослаблением роста в высоту.

После детального обследования объекта географических культур были исключены из дальнейших исследований черкасский (см. табл. 1, № 37), самарский (№ 39), донецкий (№ 40), ростовский (№ 41) и оренбургский (№ 42) климатипы ввиду небольшого количества представленных на пробной площади деревьев. В результате обработки полевого материала были получены лесоводственно-таксационные характеристики климатипов сосны обыкновенной в географических лесных культурах Авсюнинского участка лесничества Орехово-Зуевского филиала Государственного казенного учреждения Московской области «Мособллес», позволяющие оценить их потенциальную продуктивность по лесорастительным зонам в условиях Восточного Подмосковья (табл. 2).

Согласно полученным данным, все климатипы сосны обыкновенной отличаются между собой по успешности роста. Лучший рост по высоте показали лесостепные климатипы тульский (24,2 м), сумской (24,1 м) и винницкий (24,1 м), растущие, как и местная сосна по Iб классу бонитета. Худшие результаты (в пределах 18,7...19,0 м) свойственны климатипам сосны из Тюменской области, Республики Татарстан и Хабаровского края, растущие по I классу бонитета. Среди лесорастительных зон самые лучшие результаты по росту в высоту показали климатипы из зоны лиственных лесов, их средняя высота достигает 22,9 м, что составляет 96,6 % относительно контрольного значения климатипа сосны из Куровского мехлесхоза Московской области.

Что касается среднего диаметра, климатипы сосны из зоны лиственных лесов немного отстают от климатипов сосны из лесостепной зоны, средний диаметр стволов достигает 20,6 и 21,4 см

Т а б л и ц а 2

**Таксационная характеристика 47-летних климатипов сосны обыкновенной
в географических посадках Авсюнинского участкового лесничества
в контексте лесорастительных зон**

**Taxation characteristics of 47-year-old climatypes of Scots pine in geographical plantations
of the Avsiuninskoye forestry in the forest zones**

Номер экотипа	Регион, климатип	H_{cp} , м	$D_{1,3}$, см	N , шт./га	M , м ³ /га	Z_m , м ³	$V_{ств}$, м ³
Зона хвойных лесов (тайга)							
6	Республика Коми, Сыктывкарский	22,8	23,5	467	229	4,9	0,490
36	Ленинградская обл., Сиверский	21,8	18,6	942	272	5,8	0,289
60	Псковская обл., Опочецкий	19,1	17,3	1651	385	8,2	0,233
24	Костромская обл., Костромской	20,6	17,8	1198	287	6,1	0,240
64	Удмуртская Республика, Воткинский	23,5	21,6	905	369	7,9	0,408
	В среднем	21,6	19,8	1033	308	6,6	0,298
	В процентах относительно контрольного значения	91,1	102,1	85,0	77,0	77,6	90,6
Зона смешанных лесов							
43	Эстония, Вырусский	22,6	20,2	941	319	6,8	0,339
63	Литва, Тракайский	23,2	20,3	796	298	6,3	0,374
68	Гродненская обл., Волковысский	20,1	18,0	1549	403	8,6	0,260
17	Витебская обл., Россонский	23,2	21,5	1079	433	9,2	0,401
70	Минская обл., Узденский	20,9	19,1	1203	355	7,6	0,295
73	Могилёвская обл., Быховский	23,1	19,1	1331	419	8,9	0,315
71	Владимирская обл., Ковровский	22,5	18,7	1173	349	7,4	0,298
16	Московская обл., Куровской (контроль)	23,7	19,4	1215	400	8,5	0,329
25	Смоленская обл., Ярцевский	22,3	19,4	1207	376	8,0	0,312
39	Республика Марий Эл, Звениговский	23,1	19,7	1294	425	9,0	0,328
67	Республика Татарстан, Камский	18,7	16,0	1316	245	5,2	0,186
19	Чувашская Республика, Алатырский	21,1	19,9	787	251	5,3	0,319
34	Рязанская обл., Солотчинский	21,6	20,1	1358	449	9,6	0,331
	В среднем	22,0	19,3	1173	363	7,7	0,309
	В процентах относительно контрольного значения	92,8	99,5	96,5	90,8	90,6	93,9
Зона лиственных лесов							
32	Брестская обл., Пружанский	23,3	20,4	1018	370	7,9	0,363
28	Волынская обл., Цуманский	22,2	22,0	948	375	8,0	0,396
4	Гомельская обл., Гомельский	23,4	21,3	896	353	7,5	0,394
74	Черниговская обл., Остёрский	23,1	20,1	1027	360	7,7	0,351
51	Брянская обл., Гаваньский	23,1	18,9	1320	414	8,8	0,314
37	Львовская обл., Радеховский	23,7	22,0	1053	450	9,6	0,427
41	Ровенская обл., Острожский	22,8	20,8	1338	502	10,7	0,375
53	Хмельницкая обл., Славуцкий	22,4	20,6	1402	520	11,1	0,371
69	Тернопольская обл., Кременецкий	21,7	19,2	1365	420	8,9	0,308
	В среднем	22,9	20,6	1152	418	8,9	0,363
	В процентах относительно контрольного значения	96,6	106,2	94,8	104,5	104,7	110,3
Лесостепная зона							
22	Пензенская обл., Лунинский	22,1	21,2	777	303	6,4	0,390
9	Липецкая обл., Ленинский	21,4	21,3	634	234	5,0	0,369
15	Республика Мордовия, Темниковский	22,6	22,5	940	400	8,5	0,426
55	Тульская обл., Заокский	24,2	22,0	810	349	7,4	0,431
29	Орловская обл., Знаменский	22,9	19,8	1408	475	10,1	0,337
61	Воронежская обл., Воронежский	21,3	17,5	1738	452	9,6	0,260
78	Курская обл., Хомутовский	21,6	20,0	1371	449	9,6	0,327
27	Сумская обл., Шосткинский	24,1	22,8	806	385	8,2	0,478

Окончание табл. 2

Номер экотипа	Регион, климатип	H_{cp} , м	$D_{1,3}$, см	N , шт./га	M , м ³ /га	Z_m , м ³	$V_{ств}$, м ³
45	Винницкая обл., Бершадский	24,1	25,5	745	463	9,9	0,621
	В среднем	22,7	21,4	1025	390	8,3	0,380
	В процентах относительно контрольного значения	95,8	110,3	84,4	97,5	97,6	115,5
Степная зона							
47	Ульяновская обл., Старомайский	23,2	22,3	377	167	3,9	0,443
	В процентах относительно контрольного значения	97,9	114,9	31,0	41,8	45,9	134,7
Леса Урала							
12	Свердловская обл., Серовский	22,2	19,3	788	241	5,1	0,306
80	Свердловская обл., Алапаевский	20,5	18,3	903	236	5,0	0,261
42	Республика Башкортостан, Белорецкий	22,3	21,1	893	331	7,0	0,371
30	Челябинская обл., Юрюзанский	20,7	17,2	727	173	3,7	0,237
	В среднем	21,4	19,0	828	245	5,2	0,296
	В процентах относительно контрольного значения	90,1	97,9	68,1	61,3	61,2	90,0
Леса Западной Сибири							
58	Курганская обл., Мехонский	23,6	21,4	563	222	4,7	0,394
8	Тюменская обл., Тобольский	18,7	18,7	942	238	5,1	0,253
11	Омская обл., Подгородный	22,3	20,5	655	232	4,9	0,354
	В среднем	21,5	20,2	720	231	4,9	0,321
	В процентах относительно контрольного значения	90,7	104,1	59,3	57,8	57,6	97,6
Леса Центральной Сибири							
76	Новосибирская обл., Сузунский	20,9	18,8	1109	319	6,8	0,288
38	Алтайский край, Петровский	22,7	18,6	685	197	4,2	0,288
	В среднем	21,8	18,7	897	258	5,5	0,288
	В процентах относительно контрольного значения	92,0	96,4	73,8	64,5	64,7	87,5
Леса Восточной Сибири							
26	Республика Саха (Якутия), Олекминский	23,4	27,4	175	116	2,5	0,663
	В процентах относительно контрольного значения	98,7	141,2	14,4	29,0	29,4	201,5
Леса Дальнего Востока							
27	Хабаровский край, Аянский	18,9	20,5	673	206	4,4	0,306
	В процентах относительно контрольного значения	79,7	105,7	55,4	51,5	51,8	93,0
<i>Примечание.</i> H_{cp} — средняя высота насаждений, м; $D_{1,3}$ — средний диаметр деревьев в насаждении, см; N — густота стояния (количество) деревьев, шт./га; M — запас стволовой древесины, м ³ /га; Z_m — средний прирост по запасу на участке за год, м ³ ; $V_{ств}$ — средний объем ствола дерева, м ³ .							

соответственно, что составляет 106,2 и 110,3 % относительно контрольного значения. По показателю среднего диаметра наилучший результат зафиксирован у винницкого (25,5 см), сыктывкарского (23,5 см), сумского (22,8 см) и мордовского (22,5 см) климатипов. Высокое значение среднего диаметра у провениенции из Якутии (27,4 см) вызвано сильной сбежистостью стволов при низкой сохранности деревьев 175 шт./га. Худшие показатели (в пределах 16,0...17,5 м) у климатипов сосны из Республики Татарстан (16,0 см), Челябинской (17,2 см), Псковской (17,3 см) и Воронежской (17,5 см) областей.

Наибольшую сохранность показали климатипы из зоны смешанных (17,6 %) и зоны лиственных лесов (17,3 %). Самой высокой сохранностью характеризуются климатипы, представленные образцами из Воронежской (26,1 %), Псковской (24,8 %), Гродненской (23,2 %), Орловской (21,1 %) и Хмельницкой (21,0 %) областей. Наименьшая сохранность зафиксирована у климатипов из степной зоны (5,7 %), Западной Сибири (10,8 %) и Восточной Сибири (2,6 %), а также Дальнего Востока (10,1 %). Относительно низкая сохранность отмечена для сыктывкарского (7,0 %) и липецкого (9,5 %) климатипов.

Лидерами по продуктивности стволовой древесины являются климатипы из зоны лиственных лесов и лесостепной зоны, их средний запас достигает показателя 418 и 390 м³/га соответственно. Высоким запасом стволовой древесины характеризуются климатипы из Хмельницкой (520 м³/га), Ровенской (502 м³/га), Орловской (475 м³/га), Винницкой (463 м³/га), Воронежской (452 м³/га), Львовской (450 м³/га) и Курской (449 м³/га) областей, превышающие по этому показателю процент относительно контрольного значения (Московская обл. (Куровской мехлесхоз) — 400 м³/га — 100 %) на 112...130 %. Для лидирующих по запасу стволовой древесины провениенций зафиксирован также и высокий средний прирост по запасу 9,6...11,1 м³ на пробной площади за год. Наихудшие результаты по запасу стволовой древесины присущи климатипам из Ульяновской (167 м³/га), Челябинской (173 м³/га), Курганской (222 м³/га), Омской (232 м³/га), Липецкой (234 м³/га), Свердловской (Алапаевский лесхоз — 236 м³/га; Серовский лесхоз — 241 м³/га), Тюменской (238 м³/га) областей, Алтайского края (197 м³/га) и Хабаровского края (206 м³/га), Республики Саха (Якутия) (116 м³/га), Республики Коми (229 м³/га), Республики Татарстан (245 м³/га) и Чувашской Республики (251 м³/га), остальные климатипы занимают промежуточное положение.

К числу лучших провениенций по среднему объему ствола дерева следует отнести сосну из Винницкой (0,621 м³), Сумской (0,478 м³), Ульяновской (0,443 м³), Тульской (0,431 м³), Львовской (0,427 м³), Витебской (0,401 м³) областей, Республики Саха (Якутия) (0,663 м³), Республики Коми (0,490 м³), Республики Мордовия (0,426 м³) и Удмуртской Республики (0,408 м³).

Минимальные средние объемы зафиксированы у сосны из Татарстана (0,186 м³), Псковской (0,233 м³), Челябинской (0,237 м³) и Костромской (0,240 м³) областей.

Для получения полной картины о степени различия в росте и продуктивности инорайонных провениенций сосны обыкновенной и местного (подмосковного) экотипа по модифицированной методике [37] рассчитывался суммарный показатель целесообразности внедрения конкретных экотипов G как среднеарифметическое относительных значений высоты (Q_h), диаметра (Q_d), запаса (Q_m), выраженных в долях стандартного отклонения (табл. 3, рис. 4).

Итоговая оценка успешности роста и продуктивности экотипов сосны относительно местной популяции показала перспективность использования в лесокультурной практике лесничеств Московской области семян происхождением из Бершадского лесхозага Винницкой (Украина),

Т а б л и ц а 3

Относительная успешность провениенций сосны в географических посадках Авсюнинского участкового лесничества

Relative success rate of pine species in geographical plantations of Avsyuninsky forestry area

Номер экотипа	Регион, климатип	U_h	Q_h	U_d	Q_d	U_m	Q_m	G
6	Республика Коми, Сыктывкарский	-0,9	-0,65	+4,1	+3,11	-171	-2,02	+0,147
36	Ленинградская обл., Сиверский	-1,9	-1,37	-0,8	-0,61	-128	-1,51	-1,161
60	Псковская обл., Опочецкий	-4,6	-3,31	-2,1	-1,59	-15	-0,18	-1,692
24	Костромская обл., Костромской	-3,1	-2,23	-1,6	-1,21	-113	-1,33	-1,592
64	Удмуртская Республика, Воткинский	-0,2	-0,14	+2,2	+1,67	-31	-0,37	+0,386
43	Эстония, Вырусский	-1,1	-0,79	+0,8	+0,61	-81	-0,96	-0,380
63	Литва, Тракайский	-0,5	-0,36	+0,9	+0,68	-102	-1,20	-0,294
68	Гродненская обл., Волковысский	-3,6	-2,59	-1,4	-1,06	+3	+0,04	-1,205
17	Витебская обл., Россонский	-0,5	-0,36	+2,1	+1,59	+33	+0,39	+0,540
70	Минская обл., Узденский	-2,8	-2,01	-0,3	-0,23	-45	-0,53	-0,924
73	Могилёвская обл., Быховский	-0,6	-0,43	-0,3	-0,23	+19	+0,22	-0,145
71	Владимирская обл., Ковровский	-1,2	-0,86	-0,7	-0,53	-51	-0,60	-0,665
16	Московская обл., Куровской (контроль)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
25	Смоленская обл., Ярцевский	-1,4	-1,01	0,0	0,0	-24	-0,28	-0,430
39	Республика Марий Эл, Звениговский	-0,6	-0,43	+0,3	+0,23	+25	+0,29	+0,030
67	Республика Татарстан, Камский	-5,0	-3,60	-3,4	-2,58	-155	-1,83	-2,667
19	Чувашская Республика, Алатырский	-2,6	-1,87	+0,5	+0,38	-149	-1,76	-1,083
32	Брестская обл., Пружанский	-0,4	-0,29	+1,0	+0,76	-30	-0,35	+0,039
28	Волынская обл., Цуманский	-1,4	-1,01	+2,6	+1,97	-25	-0,29	+0,223
4	Гомельская обл., Гомельский	-0,3	-0,22	+1,9	+1,44	-47	-0,55	+0,223
74	Черниговская обл., Остёрский	-0,6	-0,43	+0,7	+0,53	-40	-0,47	-0,124
51	Брянская обл., Гаваньский	-0,6	-0,43	-0,5	-0,38	+14	+0,17	-0,215

Окончание табл. 3

Номер экотипа	Регион, климатип	U_h	Q_h	U_d	Q_d	U_m	Q_m	G
37	Львовская обл., Радеховский	0,0	0,0	+2,6	+1,97	+50	+0,59	+0,856
41	Ровенская обл., Острожский	-0,9	-0,65	+1,4	1,06	+102	+1,20	+0,536
53	Хмельницкая обл., Славутский	-1,3	-0,94	+1,2	+0,91	+120	+1,42	+0,463
69	Тернопольская обл., Кременецкий	-2,0	-1,45	-0,2	-0,15	+20	+0,24	-0,456
22	Пензенская обл., Лунинский	-1,6	-1,18	+1,8	+1,36	-97	-1,14	-0,320
9	Липецкая обл., Ленинский	-2,3	-1,67	+1,9	+1,44	-166	-1,96	-0,729
15	Республика Мордовия, Темниковский	-1,1	-0,79	+3,1	+2,35	0,0	0,0	+0,519
34	Рязанская обл., Солотчинский	-2,1	-1,51	+0,7	+0,53	+49	+0,58	-0,134
55	Тульская обл., Заокский	+0,5	+0,37	+2,6	+1,97	-51	-0,60	+0,581
29	Орловская обл., Знаменский	-0,8	-0,60	+0,4	+0,30	+79	+0,88	+0,194
61	Воронежская обл., Воронежский	-2,4	-1,75	-1,9	-1,44	+52	+0,61	-0,858
78	Курская обл., Хомутовский	-2,1	-1,51	+0,6	+0,45	+49	+0,58	-0,159
27	Сумская обл., Шосткинский	+0,4	+0,31	+3,4	+2,58	-15	-0,18	+0,903
45	Винницкая обл., Бершадский	+0,4	+0,29	+6,1	+4,62	+63	+0,74	+1,884
47	Ульяновская обл., Старомайский	-0,8	-0,55	+1,9	+1,44	-217	-2,56	-0,556
12	Свердловская обл., Серовский	-1,5	-1,08	-0,1	-0,08	-159	-1,88	-1,010
80	Свердловская обл., Алапаевский	-3,2	-2,30	-1,1	-0,83	-164	-1,93	-1,690
42	Республика Башкортостан, Белорецкий	-1,4	-1,01	+1,7	+1,29	-69	-0,81	-0,178
30	Челябинская обл., Юрюзанский	-3,0	-2,16	-2,2	-1,67	-227	-2,68	-2,167
58	Курганская обл., Мехонский	-0,1	-0,07	+2,0	+1,52	-178	-2,10	-0,219
8	Тюменская обл., Тобольский	-5,0	-3,60	-0,7	-0,53	-162	-1,91	-2,013
11	Омская обл., Подгородный	-1,4	-1,01	+1,1	+0,83	-168	-1,98	-0,718
76	Новосибирская обл., Сузунский	-2,8	-2,01	-0,6	-0,45	-81	-0,96	-1,141
38	Алтайский край, Петровский	-1,0	-0,72	-0,8	-0,61	-203	-2,39	-1,240
27	Хабаровский край, Аянский	-4,8	-3,45	+1,1	+0,83	-194	-2,29	-1,636

Примечание. U_h — абсолютная успешность (географический дифференциал) по высоте; Q_h — относительная успешность по высоте; U_d — абсолютная успешность (географический дифференциал) по диаметру; Q_d — относительная успешность по диаметру; U_m — абсолютная успешность (географический дифференциал) по запасу; Q_m — относительная успешность по запасу; G — комплексный показатель целесообразности внедрения климатипа.

Шосткинского лесхозага Сумской (Украина), Радеховского лесхозага Львовской (Украина), Заокского лесхоза Тульской (Россия), Россонского лесхоза Витебской (Белоруссия), Острожского лесхозага Ровенской (Украина), Славутского лесхозага Хмельницкой (Украина), Гомельского лесхоза Гомельской (Белоруссия) и Цуманского лесхозага Волынской областей (Украина), а также Темниковского лесхоза Республики Мордовия и Воткинского лесхоза Удмуртской Республики (Россия) (см. рис. 4), превышающие контрольные значения более чем на 20 % ($G = 0,223 \dots 1,884$). Следует отметить, что на объекте 65-летних географических культур сосны в Серебряноборском опытном лесничестве Института лесоведения РАН (запад Московской области), удмуртский и гомельский климатипы входят в четверку лучших [37, 39]. Подтверждение перспективности сумского и львовского климатипов получено на объекте 50-летних географических культур сосны в Свердловском лесничестве Щелковского учебно-опытного лесхоза Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана (северо-восток Московской

области), которые также входили в четверку лучших [40]. Согласно данным С.В. Савосько [31], комплексный показатель целесообразности внедрения климатипа, а также рассчитанные индексы оценки потомств в 22 и 35-летнем возрасте на объекте наших исследований подтверждают возрастную стабильность лидерства сумского, тульского, витебского, хмельницкого, гомельского, волынского, а также мордовского климатипов сосны. Климатипы из Орловской, Брестской, Черниговской, Рязанской, Могилевской и Курской областей, а также Республики Коми, Республики Марий Эл и Республики Башкортостан показали результат, близкий местному ($G = -0,178 \dots 0,194$), у остальных провениенций сосны итоговая относительная оценка лесоводственного эффекта по комплексному показателю оказалась ниже ($G = -0,215 \dots -2,667$).

Большинство из лидирующих климатипов являются весьма удаленными от места испытания в географических культурах Авсюнинского участкового лесничества, среди них только три провениенции из Тульской области и Республики

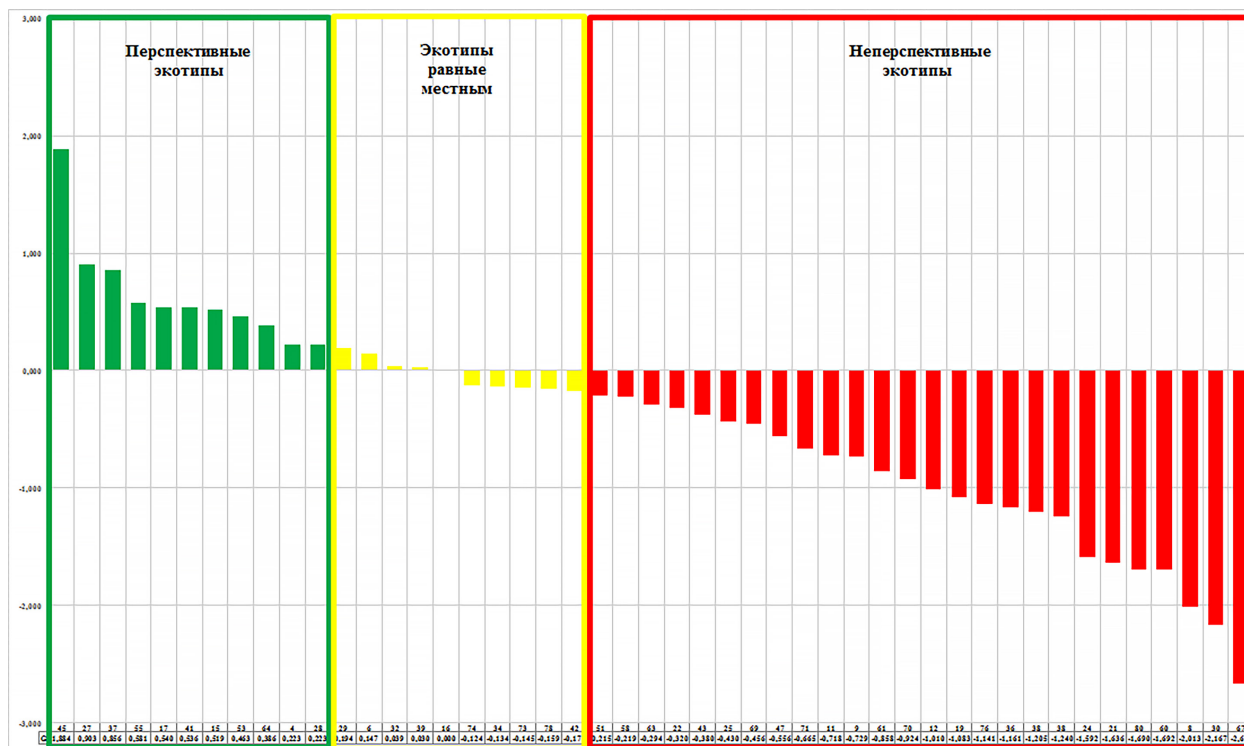


Рис. 4. Итоговая относительная оценка лесоводственного эффекта климатипов сосны по комплексному показателю (номера экотипов и комплексный показатель соответствуют табл. 3)

Fig. 4. Final relative evaluation of the silvicultural effect of pine climatotypes according to the complex indicator (ecotype numbers and complex indicator correspond to Table 3)

Мордовия (Россия) и Витебской области (Белоруссия) были включены в «Лесосеменное районирование основных лесобразующих пород» [13], что полностью отрицает стереотип сложившийся еще на ранних этапах изучения географической изменчивости древесных пород, согласно которому лучшие результаты дает использование местных семян [3].

Выводы

1. Результаты исследования 47-летних географических культур сосны в Московской области показали, что в завершающей фазе формирования стволов, в III классе возраста, искусственные древостои разных провениенций имеют существенные различия по росту, продуктивности и сохранности.

2. Итоговая относительная оценка лесоводственного эффекта климатипов сосны обыкновенной по комплексному показателю способствовала выявлению преимущества использования в условиях Мещёрской низменности семенного материала из Тульской области, Республики Мордовия и Удмуртской Республики России, Витебской и Гомельской областей Белоруссии, Винницкой, Сумской, Львовской, Ровенской, Хмельницкой и Волынской областей Украины.

3. Области, включающие в себя такие физико-географические области и районы, как Белорус-

ское Полесье и Украинское Полесье, центральную часть Русской равнины и Сарапульскую возвышенность, следует рассматривать в качестве оптимума концентрации ценного генетического материала сосны обыкновенной, который позволит в дальнейшем проводить отбор наиболее перспективных климаэкотипов.

Список литературы

- [1] Пальцев А.М., Мерзленко М.Д. Роль географических культур в лесокультурном деле. М.: МЛТИ, 1990. 54 с.
- [2] Вавилов Н.И. Дикие родичи плодовых деревьев азиатской части СССР и Кавказа и проблемы происхождения плодовых деревьев // Избранные произведения в 2 т. Т. I. Л.: Наука, 1967. С. 225–247.
- [3] Нестеров Н.С. Лесная опытная дача в Петровском-Разумовском под Москвой. М.; Л.: Государственное издательство колхозной и совхозной литературы, 1935. 560 с.
- [4] Мерзленко М.Д., Мельник П.Г. Опыт лесоводственного мониторинга в Никольской лесной даче. М.: МГУЛ, 2015. 112 с.
- [5] Мерзленко М.Д. Теоретические основы и практические направления изучения географических культур // Научные труды МГУЛ, 1993. Вып. 265. С. 62–67.
- [6] Огиевский В.Д. Избранные труды. М.: Лесная промышленность, 1966. 356 с.
- [7] Правдин Л.Ф., Вакуров А.Д. Рост сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) разного географического происхождения в подзоне хвойно-широколиственных лесов // Сложные боры хвойно-широколиственных лесов и пути ведения лесного хозяйства в лесопарковых условиях Подмосквья. М.: Наука, 1968. С. 160–195.

- [8] Мерзленко М.Д. Географические культуры сосны в Щелковском учебно-опытном лесхозе Московской области // Лесохозяйственная информация, 1996. № 3. С. 20–24.
- [9] Михайлова М.И. Состояние, рост и продуктивность экотипов сосны обыкновенной в географических лесных культурах Воронежской области: дис. ... канд. с.-х. наук: 06.03.01. Воронеж: ВГЛУ, 2022. 219 с.
- [10] Проказин А.Е. Географические культуры сосны обыкновенной и вопросы лесосеменного районирования в Центральном районе зоны смешанных лесов: дис. ... канд. с.-х. наук: 06.03.01. М.: МЛТИ, 1983. 367 с.
- [11] Проказин Е.П. Изучение имеющихся и создание новых географических культур: Программа и методика работ. Пушкино: Изд-во ВНИИЛМ, 1972. 52 с.
- [12] Родин А.Р., Проказин А.Е. Географическая изменчивость основных лесобразующих пород // Экология, мониторинг и природопользование: сб. науч. тр. МГУЛ, 2000. Вып. 302 (I). С. 114–118.
- [13] Лесосеменное районирование основных лесобразующих пород в СССР. М.: Лесная пром-сть, 1982. 368 с.
- [14] Самофал С.А. Климатические расы обыкновенной сосны и роль их в организации семенного хозяйства СССР // Труды по лесному опытному делу, 1925. Вып. 1. С. 5–50.
- [15] Кобранов Н.П. Обследование и исследование лесных культур // Труды по лесному опытному делу, 1930. Вып. VIII. С. 1–102.
- [16] Обновленский В.М. Опыт изучения климатических экотипов сосны обыкновенной в культурах Брянского учебно-опытного лесхоза // Труды Брянского лесохозяйственного института, 1940. Т. 2–3. С. 119–164.
- [17] Вересин М.М. Лесное семеноводство. М.: Гослесбуиздат, 1963. 158 с.
- [18] Правдин Л.Ф. Сосна обыкновенная. Изменчивость, внутривидовая систематика и селекция. М.: Наука, 1964. 191 с.
- [19] Яблоков А.С. Лесосеменное хозяйство. М.: Лесная пром-сть, 1965. 465 с.
- [20] Войчалъ П.И. О естественном отборе в инорайонных культурах популяции сосны // Лесная генетика, селекция и семеноводство. Петрозаводск: Карелия, 1970. С. 393–395.
- [21] Danilov Y.I., Guzyuk M.Ye., Fetisova A.A., Nikolaeva M.A. Analysis of the preservation and growth of scots pine in the provenance trials of professor Vasily Ogievsky in educational-experimental forestry // IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2019, v. 226, p. 012054. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012054>
- [22] Кузьмин С.Р., Кузьмина Н.А. Отбор перспективных климатипов сосны обыкновенной в географических культурах разных лесорастительных условий // Лесоведение, 2020. № 5. С. 34–43. <https://doi.org/10.31857/S0024114820050083>
- [23] Михайлова М.И., Чернышов М.П., Ребко С.В. О лучших геоэкотипах сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) для искусственного лесовосстановления // Лесотехнический журнал, 2023. Т. 13. № 4 (52). Ч. 1. С. 58–71. <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/4>
- [24] Chernyshov M., Mikhailova M. The structure in diameter and sanitary condition of geographical cultures of Scots pine and // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2021, v. 875, p. 012054. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012054>
- [25] Rabko S., Kozel A., Kimeichuk I., Yukhnovskiy V. Comparative assessment of some physical and mechanical properties of wood of different Scots pine climatypes // Scientific Horizons, 2021, v. 24(2), pp. 27–36. [https://doi.org/10.48077/scihor.24\(2\).2021.27-36](https://doi.org/10.48077/scihor.24(2).2021.27-36)
- [26] Nakvasina E.N., Prozherina N.A. Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) reaction to climate change in the provenance tests in the north of the Russian plain // Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry, 2021, v. 63 (2), pp. 138–149. <https://doi.org/10.2478/ffp-2021-0015>
- [27] Parfenova E.I., Kuzmina N.A., Kuzmin S.R., Tchebakova N.M. Climate Warming Impacts on Distributions of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Seed Zones and Seed Mass across Russia in the 21st Century // Forests, 2021, v. 12, p. 1097. <https://doi.org/10.3390/f12081097>
- [28] Роговцев П.В. Репродуктивный потенциал географических культур сосны в условиях Западной Сибири // Хвойные бореальной зоны, 2007. Т. XXIV. № 2–3. С. 279–283.
- [29] Кузьмин С.Р., Кузьмина Н.А. Морфологические особенности хвои у сосны обыкновенной с разной устойчивостью к грибным болезням // Экология, 2015. № 2. С. 156–160. <https://doi.org/10.7868/S0367059715010084>
- [30] Potokina E.K., Kiseleva A.A., Nikolaeva M.A., Ivanov S.A., Ulianich P.S., Potokin A.F. Analysis of the polymorphism of organelle DNA to elucidate the phylogeography of norway spruce in the East European Plain // Russian Journal of Genetics: Applied Research. 2015. Vol. 5. No 4. Pp. 430-439. DOI: 10.1134/S2079059715040176
- [31] Савосько С.В. Успешность роста сосны обыкновенной в географических культурах центрального района зоны смешанных лесов // Леса Евразии в XXI веке: Восток-Запад: Материалы II Междунар. конф. молодых ученых, посвященной профессору И.К. Пачоскому. М.: МГУЛ, 2002. С. 121–123.
- [32] ОСТ 56-69-83. Пробные площади лесоустроительные. Методы закладки. М.: Изд-во стандартов, 1983. 59 с.
- [33] Анучин Н.П. Лесная таксация. М.: Лесная пром-сть, 1971. 512 с.
- [34] Giertych M. Summary results of the IUFRO 1938 Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst) provenance experiment Height growth // Silvae Genetica, 1976, v. 25, no. 5–6, pp. 154–164.
- [35] Giertych M. Summary of results on Scotch pine (*Pinus sylvestris* L.) height growth in IUFRO provenance experiments // Silvae Genetica, 1979, v. 28, no. 4, pp. 136–152.
- [36] Paule L., Laffers A., Korpel S. Ergebnisse der Provenienzversuche mit der Tanne in der Slowakei // VÜLH. Zvolen (Forschungsbericht), 1985, pp. 137–159.
- [37] Мерзленко М.Д., Мельник П.Г., Глазунов Ю.Б., Коженкова А.А., Перевалова Е.А. Результаты изучения географических посадок сосны и лиственницы в Серебрянборском опытном лесничестве // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 6. С. 34–43. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-6-3>
- [38] Мерзленко М.Д., Бабич Н.А., Гаврилова О.И. Введение в экологию хвойных лесных культур. Архангельск: Изд-во САФУ, 2018. 379 с.
- [39] Мельник П.Г., Глазунов Ю.Б., Мерзленко М.Д. Рост и производительность удмуртского климатипа сосны обыкновенной в условиях Подмосквья // Вестник Казанского государственного аграрного университета, 2018. № 4 (51). С. 66–71.
- [40] Мельник П.Г., Мерзленко М.Д. Результат выращивания климатипов сосны в географических культурах северо-восточного Подмосквья // Лесотехнический журнал, 2014. № 4 (16). С. 36–44.

Сведения об авторе

Мельник Петр Григорьевич — канд. с.-х. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), melnik_petr@bk.ru

Поступила в редакцию 22.08.2024.

Одобрено после рецензирования 06.09.2024.

Принята к публикации 20.09.2024.

GROWTH, PRODUCTIVITY AND PRESERVATION OF SCOTS PINE (*PINUS SYLVESTRIS* L.) CLIMATYPES IN MESHCHERA LOWLAND CONDITIONS

P.G. Mel'nik

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

melnik_petr@bk.ru

The results of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) climatotypes growing in the Avsyuninsky district forestry located on the territory of the Meshcherskaya lowland in the eastern part of the Moscow region are presented. The presented range of tested provenances is quite wide and in the meridional direction covers the area of the genus *Pinus* from the Baltic States (Lithuania, Estonia) to the Khabarovsk Territory (Far East, Russia). It was found that the forest-steppe climatotypes Tula (24,2 m), Sumy (24,1 m) and Vinnytsia (24,1 m) are the leaders in height, growing like the local pine according to the Ib class of growth. The average diameter of the pine trunk has been determined. The best result was recorded in the Vinnytsia, Syktyvkar, Sumy and Mordovian (22,5...25,5 cm) climatotypes. A high stock of stem wood was found in climatotypes from the Khmel'nitsky, Rivne, Vinnytsia, Lviv regions of Ukraine, Oryol, Voronezh and Kursk regions of Russia, exceeding the percentage relative to control (Moscow region — 400 m³/ha — 100%) by 112...130%. For the provenances leading in the stock of stem wood, a high average increase in the stock of 9.6...11.1 m³ per site per year was also recorded. The assessment of the forestry effect is given according to the complex indicator of the expediency of introducing specific pine provenances. Viable climatotypes of Scots pine have been identified both in Russia and abroad.

Keywords: Scots pine, *Pinus sylvestris*, climatype, geographical forest plantations, silvicultural effect, Meshchera Lowland

Suggested citation: Mel'nik P.G. Rost, produktivnost' i sokhrannost' klimatipov sosny obyknovnoy (*Pinus sylvestris* L.) v usloviyakh Meshchoyrskoy nizmennosti [Growth, productivity and preservation of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) climatotypes in Meshchera lowland conditions]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2024, vol. 28, no. 5, pp. 68–82. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-68-82

References

- [1] Pal'tsev A.M., Merzlenko M.D. *Rol' geograficheskikh kul'tur v lesokul'turnom dele* [The role of provenances in forest breeding practice]. Moscow: MLTI, 1990, 54 p.
- [2] Vavilov N.I. *Dikie rodichi plodovykh derev'ev aziatskoy chasti SSSR i Kavkaza i problemy proiskhozhdeniya plodovykh derev'ev* [Wild relatives of fruit trees of the Asian part of the USSR and the Caucasus and problems of the origin of fruit trees]. Selected works in 2 vol., v. I. Leningrad: Nauka, 1967, pp. 225–247.
- [3] Nesterov N.S. *Lesnaya opyt'naya dacha v Petrovskom-Razumovskom pod Moskvoy* [Forest experimental cottage in Petrovsky-Razumovsky near Moscow]. Moscow–Leningrad: Gosudarstvennoye izdatel'stvo kolhoznoy i sovkhovnoy literatury [State Publishing House of Collective Farm and State Farm Literature], 1935, 560 p.
- [4] Merzlenko M.D., Mel'nik P.G. *Opyt lesovodstvennogo monitoringa v Nikol'skoy lesnoy dache* [Experience of silvicultural monitoring in Nikol'skaya forest estate]. Moscow: MSFU, 2015, 112 p.
- [5] Merzlenko M.D. *Teoreticheskie osnovy i prakticheskie napravleniya izucheniya geograficheskikh kul'tur* [Theoretical foundations and practical aspects of provenances study]. Nauch. tr. MLTI [Transactions of MLTI], 1993, iss. 265, pp. 62–67.
- [6] Ogievsky V.D. *Izbrannye trudy* [Selected works]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest industry], 1966, 356 p.
- [7] Pravdin L.F., Vakurov A.D. *Rost sosny obyknovnoy (Pinus sylvestris L.) raznogo geograficheskogo proiskhozhdeniya v podzone khvoynno-shirokolistvennykh lesov* [Growth of common pine (*Pinus sylvestris* L.) of different geographical origin in the subzone of coniferous-deciduous forests]. Slozhnye bory khvoynno-shirokolistvennykh lesov i puti vedeniya lesnogo khozyaystva v lesoparkovykh usloviyakh Podmoskov'ya. Moscow: Nauka, 1968, pp. 160–195.
- [8] Merzlenko M.D. *Geograficheskie kul'tury sosny v Shchelkovskom uchebno-opytnom leskhoze Moskovskoy oblasti* [Geographic cultures of pine in Shchelkovo training and experimental forestry of the Moscow region]. Lesokhozyaystvennaya informatiya [Forestry Information], 1996, no. 3, pp. 20–24.

- [9] Mikhailova M.I. *Sostoyanie, rost i produktivnost' ekotipov sosny obyknovnoy v geograficheskikh lesnykh kul'turakh Voronezhskoy oblasti* [Status, growth and productivity of Scots pine ecotypes in geographical forest cultures of the Voronezh region]. Dis. Cand. Sci. (Agric.) 06.03.01. Voronezh: VSUFT, 2022, 219 p.
- [10] Prokazin A.E. *Geograficheskie kul'tury sosny obyknovnoy i voprosy lesosemennogo rayonirovaniya v Tsentral'nom rayone zony smeshannykh lesov* [Geographical cultures of scots pine and issues of forest-seed zoning in the Central region of the zone of mixed forests]. Dis. Cand. Sci. (Agric.) 06.03.01. Moscow: MLTI, 1983, 367 p.
- [11] Prokazin E.P. *Izucheniye imeyushchikhsya i sozdaniye novykh geograficheskikh kul'tur: Programma i metodika rabot* [Study of existing and creation of new geographical cultures: Program and methodology of work]. Pushkino, 1972, 52 p.
- [12] Rodin A.R., Prokazin A.E. *Geograficheskaya izmenchivost' osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod* [Geographic Variation of the Main Forest-Forming Species]. *Ekologiya, monitoring i ratsional'noe prirodopol'zovanie* [Ecology, Monitoring and Environmental Management], 2000, no. 302(I), pp. 114–118.
- [13] *Lesosemennoe rayonirovaniye osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod v SSSR* [Forest seed zoning of the main forestforming species in the USSR]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest industry], 1982, 368 p.
- [14] Samofal S.A. *Klimaticheskie rasy obyknovnoy sosny i rol' ikh v organizatsii semennogo khozyaystva SSSR* [Climatic races of the common pine and their role in the organization of the seed economy of the USSR]. *Trudy po lesnomu opytному delu* [Proceedings on experimental forestry], 1925, iss. 1, pp. 5–50.
- [15] Kobranov N.P. *Obsledovaniye i issledovaniye lesnykh kul'tur* [Survey and research of forest crops]. *Trudy po lesnomu opytному delu* [Proceedings on experimental forestry], 1930, iss. VIII, pp. 1–102.
- [16] Obnovlenskii V.M. *Opyt izucheniya klimaticheskikh ekotipov sosny obyknovnoy v kul'turakh Bryanskogo uchebno-opytного leskhozа* [The experience of studying the climatic ecotypes of Scots pine in the crops of the Bryansk educational and experimental forestry]. *Trudy Bryanskogo LKHI* [Proceedings of the Bryansk Forestry Institute], 1940, v. 2–3, pp. 119–164.
- [17] Veresin M.M. *Lesnoye semenovodstvo* [Forest Seed Production]. Moscow: Goslesbumizdat, 1963, 158 p.
- [18] Pravdin L.F. *Sosna obyknovennaya. Izmenchivost', vnutrividovaya sistematika i selektsiya* [Common pine. Variability, intraspecific taxonomy and selection]. Moscow: Nauka, 1964, 190 p.
- [19] Yablokov A.S. *Lesosemennoe khozyaystvo* [Forest Seed Management]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest industry], 1965, 466 p.
- [20] Voychal P.I. *O estestvennom otbore v inorayonnykh kul'turakh populyatsii sosny* [On natural selection in non-district cultures of the pine population]. *Lesnaya genetika, selektsiya i semenovodstvo* [Forest genetics, breeding and seed production]. Petrozavodsk: Karelia, 1970, pp. 393–395.
- [21] Danilov Y.I., Guzyuk M.Ye., Fetisova A.A., Nikolaeva M.A. Analysis of the preservation and growth of scots pine in the provenance trials of professor Vasily Ogievsky in educational-experimental forestry. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2019, v. 226, p. 012054. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012054>
- [22] Kuz'min S.R., Kuz'mina N.A. *Otbor perspektivnykh klimatipov sosny obyknovnoy v geograficheskikh kul'turakh raznykh lesorastitel'nykh usloviy* [Selection of promising climatypes of Scots pine in geographical cultures of different forest conditions]. *Lesovedeniye* [Forest science], 2020, no. 5, pp. 451–465. <https://doi.org/10.31857/S0024114820050083>
- [23] Mikhailova M.I., Chernyshov M.P., Rabko S.U. *O luchshikh geokotipakh sosny obyknovnoy (Pinus sylvestris L.) dlya iskusstvennogo lesosostanovleniya* [About the best geocotypes of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) for artificial reforestation]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], 2023, v. 13, no. 4 (52), part 1, pp. 58–71. <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/4>
- [24] Chernyshov M., Mikhailova M. The structure in diameter and sanitary condition of geographical cultures of Scots pineand. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2021, v. 875, p. 012054. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012054>
- [25] Rabko S., Kozel A., Kimeichuk I., Yukhnovskiy V. Comparative assessment of some physical and mechanical properties of wood of different Scots pine climatypes. *Scientific Horizons*, 2021, v. 24(2), pp. 27–36. [https://doi.org/10.48077/scihor.24\(2\).2021.27-36](https://doi.org/10.48077/scihor.24(2).2021.27-36)
- [26] Nakvasina E.N., Prozherina N.A. Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) reaction to climate change in the provenance tests in the north of the Russian plain. *Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry*, 2021, v. 63 (2), pp. 138–149. <https://doi.org/10.2478/ffp-2021-0015>
- [27] Parfenova E.I., Kuzmina N.A., Kuzmin S.R., Tchepakova N.M. Climate Warming Impacts on Distributions of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Seed Zones and Seed Mass across Russia in the 21st Century. *Forests*, 2021, v. 12. p. 1097. <https://doi.org/10.3390/f12081097>
- [28] Rogovtsev R.V. *Reproduktivnyy potentsial geograficheskikh kul'tur sosny v usloviyakh Zapadnoy Sibiri* [The reproductive potential of geographical plantations of pines in the Western Siberia]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Conifers of the boreal area], 2007, v. XXIV, no. 2–3, pp. 279–283.
- [29] Kuzmin S.R., Kuzmina N.A. *Morfologicheskie osobennosti khvoi u sosny obyknovnoy s raznoy ustoychivost'yu k gribnym bolezniam* [Morphological Distinctions of Needles in Scots Pine with Various Resistance Levels to Fungal Diseases]. *Ekologiya* [Ecology], 2015, no. 2, pp. 156–160. <https://doi.org/10.7868/S0367059715010084>
- [30] Potokina E.K., Kiseleva A.A., Nikolaeva M.A., Ivanov S.A., Ulianich P.S., Potokin A.F. Analysis of the polymorphism of organelle DNA to elucidate the phylogeography of norway spruce in the East European Plain // *Russian Journal of Genetics: Applied Research*. 2015. Vol. 5. No 4. Pp. 430-439. DOI: 10.1134/S2079059715040176
- [31] Savosko S.V. *Uspeshnost' rosta sosny obyknovnoy v geograficheskikh kul'turakh tsentral'nogo rayona zony smeshannykh lesov* [The success of the growth of Scots pine in the geographical cultures of the central region of the mixed forest zone]. *Lesa Evrazii v XXI veke: Vostok – Zapad: materialy II Mezhdunarod. konf. molodykh uchenykh, posvyashchennoy I.K. Pachoskomu* [The forests of Eurasia in the XXI century: East–West: materials of the II International. conf. young scientists dedicated to I.K. Pachosky.]. Moscow, October 01–05, 2002. Moscow: MGUL, 2002, pp. 121–123.
- [32] OST 56–69–83. *Probnye ploshchadi lesoustroitel'nye. Metody zakladki* [Industrial Standard 56–69–83. Sampling Areas of Forest Inventory. The Plantation Establishment Principles]. Moscow: Publishing house of standards, 1983, 59 p.
- [33] Anuchin N.P. *Lesnaya taksatsiya* [Forest taxation]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest industry], 1971, 512 p.
- [34] Giertych M. Summary results of the IUFRO 1938 Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst) provenance experiment Height growth. *Silvae Genetica*, 1976, v. 25, no. 5–6, pp. 154–164.

- [35] Giertych M. Summary of results on Scotch pine (*Pinus sylvestris* L.) height growth in IUFRO provenance experiments. *Silvae Genetica*, 1979, v. 28, no. 4, pp. 136–152.
- [36] Paule L., Laffers A., Korpel S. Ergebnisse der Provenienzversuche mit der Tanne in der Slowakei. *VÚLH. Zvolen (Forschungsbericht)*, 1985, pp. 137–159.
- [37] Merzlenko M.D., Mel'nik P.G., Glazunov Yu.B., Kozhenkova A.A., Perevalova E.A. *Rezultaty izucheniya geograficheskikh posadok sosny i listvennitsy v Serebryanoborskom opytном lesnichestve* [Study results of pine and larch provenance trial in Serebryanoborsky experimental forest district] // *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 6, pp. 34–43. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-6-34-43>
- [38] Merzlenko M.D., Babich N.A., Gavrilova O.I. *Vvedenie v ekologiyu khvoynykh lesnykh kul'tur* [Introduction to the Ecology of Coniferous Forest Crops]. Arkhangelsk: NArFU, 2018, 379 p.
- [39] Mel'nik P.G., Glazunov Yu.B., Merzlenko M.D. *Rost i proizvoditel'nost' udmurtskogo klimatipa sosny obyknovnoy v usloviyah Podmoskov'ya* [The growth and productive capacity of the Udmurtia climatic types of Scots pine in conditions of Moscow region]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Kazan State Agrarian University], 2018, no. 4 (51), pp. 66–71.
- [40] Mel'nik P.G., Merzlenko M.D. *Rezultat vyrashhivaniya klimatipov sosny v geograficheskikh kul'turakh severo-vostochnogo Podmoskov'ya* [The results of scots pine climatic provenances growth in the geographical plantations of the north-east of the Moscow region]. *Lesotekhnicheskii zhurnal*, 2014, no. 4 (16), pp. 36–44.

Author's information

Mel'nik Petr Grigor'evich — Cand. Sci. (Agricultural), Assoc. Prof. BMSTU (Mytishchi branch), melnik_petr@bk.ru

Received 22.08.2024.

Approved after review 06.09.2024.

Accepted for publication 20.09.2024.

ОЦЕНКА ПЛЮСОВЫХ ДЕРЕВЬЕВ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ (*PINUS SYLVESTRIS* L.)

Р.А. Третьякова¹, О.В. Паркина^{1✉}, Р.В. Роговцев², О.Е. Якубенко¹

¹ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный аграрный университет», Россия, 630039, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, д. 160

²Филиал ФБУ «Рослесозащита» – «ЦЗЛ Новосибирской области», Россия, 630015, г. Новосибирск, ул. Гоголя, д. 221

Parkinaoksana@yandex.ru

Рассмотрены основные особенности отбора плюсовых деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на территории Новосибирской обл., отмечено ее экологическое, средообразующее и хозяйственное значение. Представлена доля участия сосны обыкновенной в составе лесосеменных объектов. Определены тенденции изменения селекционно-семеноводческих объектов исследуемой породы за период с 1998–2023 гг. Установлена необходимость проведения работ по отбору лучших деревьев и по всесторонней оценке их генетического потенциала с последующим использованием для заготовки высококачественного семенного сырья в целях повышения продуктивности и качества древостоев. Выполнен отбор кандидатов в плюсовые деревья на территории Кольванского лесничества Орско-Симанского лесохозяйственного участка и Ордынского лесничества Караканского лесохозяйственного участка Новосибирской обл. за период с 2021 по 2023 гг. Предложены перспективные направления развития лесосеменных объектов сосны на территории Новосибирской обл.

Ключевые слова: сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), насаждения, плюсовое дерево, таксационные показатели, лесосеменные объекты

Ссылка для цитирования: Третьякова Р.А., Паркина О.В., Роговцев Р.В., Якубенко О.Е. Оценка плюсовых деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 5. С. 83–93. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-83-93

Важными задачами современной лесной генетики и селекции являются изучение и оптимизация методов сохранения и рационального использования ценного генофонда древесных пород [1, 2].

К настоящему времени накоплен значительный объем данных в этой области, проанализированы результаты научных исследований отечественных и зарубежных авторов [3–18].

Современное состояние и тенденции устойчивого развития лесного семеноводства отражены в Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года [19]. В разделе о совершенствовании воспроизводства лесов акцентируется внимание на создании лесосеменных объектов взамен устаревших и увеличении объемов заготовки семян с улучшенными наследственными свойствами. Это в первую очередь относится к основным лесообразующим породам, в числе которых важнейшее значение имеет сосна обыкновенная [20–24].

Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) — главная лесообразующая порода Западной Сибири [15–16, 25–28]. Особенности морфометрических и биологических характеристик данного вида рассмотрены в многочисленных исследовательских работах [16, 26–28, 29, 30].

На территории России аттестовано 9404,4 га плюсовых насаждений и 16 310 плюсовых деревьев исследуемой породы, 3320,9 га лесосеменных плантаций, из которых 2499,2 га аттестовано, создано 310,8 га архивов клонов, 128,9 га маточных плантаций, 404,9 га испытательных культур. Разработаны рекомендации по отбору плюсовых деревьев сосны обыкновенной для регионов Западной Сибири и Бурятии [13].

Сохранение биоразнообразия и хозяйственно ценных экземпляров сосны обыкновенной является важной проблемой лесного хозяйства. Необходимо изучать внутривидовую изменчивость сосны обыкновенной для отбора представителей с наиболее значимыми признаками [27, 31–34].

Актуальность исследований обусловлена прежде всего задачами повышения продуктивности и качества лесов, интенсификации лесовыращивания, необходимостью продолжения работ по селекционному семеноводству и созданию лесосеменных объектов.

Цель работы

Цель работы — изучение состояния объектов генетико-селекционного комплекса сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и анализ проведения отбора плюсовых деревьев на территории Новосибирской обл.

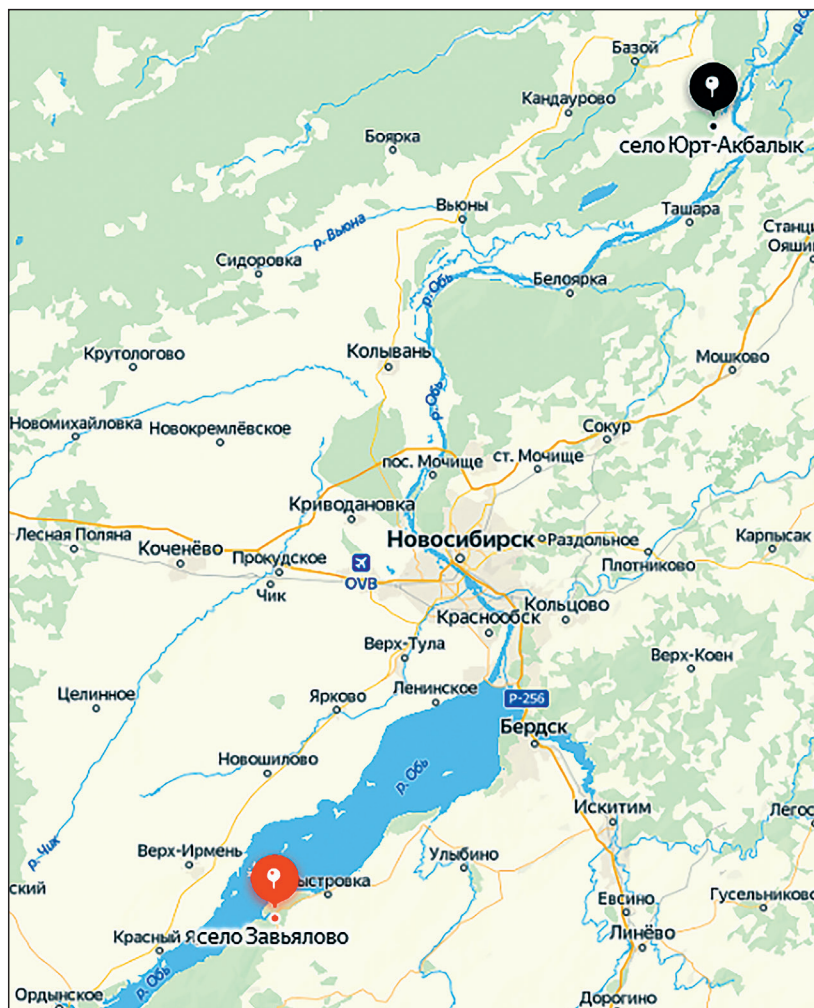


Рис. 1. Местоположение насаждений сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.)
 Fig. 1. Location of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) plantations

Объекты и методы исследования

Объекты исследования — насаждения сосны обыкновенной на территории Кольванского лесничества Орско-Симанского лесохозяйственного участка и Ордынского лесничества Караканского лесохозяйственного участка Новосибирской обл. (рис. 1).

В Новосибирской обл. сумма атмосферных осадков за год составляет около 400...500 мм, преобладающее направление ветра — юго-западное. Vegetация в среднем длится 155 сут. Около 170 сут. сохраняется снежный покров, высота которого составляет 35...60 см. Безморозный период продолжается от 90 до 140 сут. В целом климат характеризуется как континентальный.

Кольванское лесничество расположено в Кольванском районе севернее Новосибирска — в северо-восточной части Новосибирской обл., граничит с Новосибирским, Коченевским, Чулымским, Мошковским районами. В структуру лесничества входит Шегарский, Пихтовский, Тоя-

Баксинский, Кольванский участок № 1, Кандауровский, Орско-Симанский, Пихтовский № 2, Вьюнский, Кольванский № 2 лесохозяйственные участки.

Рельеф местности однороден. Территория, на которой находятся лесосеменные объекты, представляет собой переходную часть Приобского плато. Климат Кольванского района континентальный с коротким летом и продолжительной зимой. Количество атмосферных осадков в среднем составляет 595 мм в год, при этом в теплое время года выпадает 292 мм (49 %) осадков. Достаточные запасы влаги в почве за счет осенне-зимних осадков и близкое залегание грунтовых вод исключают опасность почвенной засухи. Продолжительность безморозного периода составляет на севере района 87 сут., на юге — 110...115 сут., вегетационного периода — 119...157 сут. Средняя продолжительность периода с устойчивым снежным покровом составляет на севере района 164...170 сут., на юге — 157...162 сут. Ветровой режим характеризуется преобладанием ветров

юго-западного направления. Реки относятся к бассейну р. Оби. Наиболее крупными являются реки Шегарка, Бакса, Тоя, Оеш. Озера в основном пойменные: Минзелинское, Селитрино, Полянино, Мысово, Труба, Белое, Козыки, Устиново, Сумное и др. Северо-восточнее оз. Мензелинское располагается памятник природы регионального значения «Болото Минзелинское» — природный комплекс, который поддерживает гидрологический режим окружающих территорий и стабилизирует микроклимат.

Велико полезационное и водоохранное значение лесов в рассматриваемом районе. В зимнее время леса предотвращают сдувание снега, замедляют его таяние, способствуя накоплению почвенной влаги. Колочные леса сокращают испарение с прилегающих полей, способствуют перераспределению осадков по элементам рельефа, уменьшают поверхностный сток. Немаловажное значение в предотвращении ветровой и водной эрозии имеют березовые насаждения, обладающие устойчивостью к временному затоплению и высокой транспирирующей способностью, снижают излишнее увлажнение почв, улучшая физические свойства почвы и повышая ее плодородие. Разнообразие почвенных и климатических условий влияет на рост древостоя в высоту. Климатические условия района обеспечивают нормальные условия роста и развития древесной и кустарниковой растительности.

Ордынский район расположен в южной части центрально-восточной зоны Новосибирской обл., граничит с Искитимским, Кочковским, Коченевским, Новосибирским, Сузунским, Чулымским районами и Алтайским краем. В структуру лесничества входит Антоновский, Кирзинский, Спиринский, Нижнекаменский, Усть-Хмелевский, Чингисский, Алеуский, Петровский, Шайдуровский, Караканский, Ордынский № 1, Ордынский № 2 лесохозяйственные участки.

Географической особенностью Ордынского района является разделение его Новосибирским водохранилищем на две части: большую, левобережную, на территории которой находятся все крупные населенные пункты, и меньшую — правобережную. Площадь Ордынского района составляет 160 800 га; в том числе хвойные леса — 64 600 га. Общий запас древесины равен 23 300 000 м³, в том числе хвойных пород — 16 100 000 м³. Общая площадь не покрытых лесной растительностью земель — 1883 га (1,1 %) общей площади земель лесного фонда.

Климат Ордынского района имеет выраженный континентальный характер с холодной продолжительной зимой и жарким коротким летом, что обусловлено расположением территории в центре материка и характером рельефа юго-востока

Западно-Сибирской низменности. Устойчивый снежный покров появляется в конце октября — начале ноября и сохраняется до середины апреля. Средняя глубина промерзания почвы под пологом леса около 0,7 м, на открытых местах — 1,4...1,5 м. Преобладают юго-западные ветры, средняя скорость ветра 4 м/с.

Большая часть территории района расположена на Приобском плато и представляет собой повышенную равнину, немного наклоненную к долине р. Оби. Для рассматриваемой территории характерны черноземы: выщелоченные среднегумусные, среднемощные и обыкновенные среднегумусные, среднемощные. Район имеет разветвленную речную сеть. Основная географическая достопримечательность Ордынского района — Новосибирское водохранилище. На правобережной части Новосибирского водохранилища находится Караканский бор. Природный парк «Караканский бор» имеет статус особо охраняемой природной территории регионального значения. Предназначен для сохранения рекреационных ресурсов, уникальных и типичных природных комплексов и объектов.

Исследование проводили в соответствии с нормативными документами по лесоводству и лесному семеноводству в РФ: Лесным кодексом Российской Федерации [35], Федеральным законом «О семеноводстве» [36], Указаниями по лесному семеноводству в Российской Федерации [31], Приказом Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации № 438 «Об утверждении правил создания и выделения объектов лесного семеноводства» [37].

В предварительно намеченных насаждениях выполняли закладку постоянных пробных площадей (ППП) со сплошным перечетом деревьев по общепринятым в таксации методам [38, 39]. При натурном обследовании объектов осуществляли оценку их состояния на период проведения исследований.

В отбор включены в первую очередь высокополнотные насаждения, с преобладанием в составе сосны, по возможности, одновозрастные, в лучших лесорастительных условиях — не ниже I класса бонитета, в возрасте от 40 до 90 лет. При этом учитывались данные о начале и интенсивности всех видов рубок.

При этом в соответствии с рекомендациями [16, 31, 40, 41] описывали селекционную структуру насаждений, которая отражает соотношение деревьев различных селекционных категорий — плюсовых, лучших нормальных, нормальных и минусовых. Дополнительную характеристику деревьев осуществляли в соответствии с «Методикой изучения внутривидовой изменчивости древесных пород» [42].

Т а б л и ц а 1

Лесосеменные объекты сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.)Seed objects of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.)

Объект	На 01.01.2007 г.	На 01.01.2009 г.	На 01.01.2023 г.
Плюсовые деревья, шт.	401	306	290
Плюсовые насаждения, га	40	31,6	31,6
Лесосеменные плантации, га			
всего	86	66,9	56,7
в том числе аттестованные	47	37	56,7
Архивы клонов, га	25	24,7	24,7
Испытательные культуры, га	11,3	11,3	11,3
Постоянные лесосеменные участки, га			
всего	238,4	6,8	18,3
в том числе аттестованные	160,3	6,8	6,8
Лесные генетические резерваты, га	1381	1193	1193
Географические культуры, га	15,4	15,4	15,4

В одновозрастных чистых по составу высокополнотных насаждениях плюсовые деревья должны превышать средние показатели древо-стоя по высоте деревьев на 10 % и более, по диаметру ствола — на 30 % и более. К лучшим нормальным относятся деревья с превышением по диаметру ствола на 15...30 % и по высоте на 5...10 %. К нормальным относятся деревья с диаметром ствола 0,81...1,15 % среднего значения, к минусовым — с диаметром ствола 0,80 % среднего значения и ниже. Отмечается наличие прямого полнодревесного ствола, хорошо очищенного от сучьев. Протяженность бессучковой зоны — не менее 35...65 % высоты дерева (в зависимости от возраста). Рекомендуются выделять деревья с острровершинной симметричной кроной протяженностью не более 30...40 % высоты дерева [16].

Отнесение деревьев к той или иной селекционной категории проводили по более детализированным придержкам [41] и с дополнительным выделением категории «лучших нормальных» деревьев [16].

Полученные данные обрабатывали с применением пакетов статистической программы Excel.

Результаты и обсуждение

Селекционно-семеноводческие объекты сосны обыкновенной включают в себя лесосеменные плантации, архивы клонов, маточные плантации, которые сосредоточены преимущественно в Елбашинском селекционном питомнике АО «Бердский лесхоз» (на Бердском лесосеменном участке Искитимского лесничества) (табл. 1).

В отчетность по итогам инвентаризации селекционно-семеноводческих объектов входят сводные ведомости, пояснительная записка к ним и протоколы рассмотрения материалов инвентаризации.

Аттестованные плюсовые деревья сосны обыкновенной выделены в Маслянинском, Тогучинском, Коуракском, Чингисском, Усть-Хмелевском, Белоярском, Сузунском, Бобровском, Спиринском, Бердском, Легостаевском, Гуселетовском и Новосибирском лесничествах.

Актуальные данные занесены в ведомость плюсовых деревьев после инвентаризации, которая содержит наименование лесничества, квартал, выдел, номер по государственному реестру, номер по предприятию, видовое название, селекционную категорию, происхождение, характеристику цвета и фактуры коры, превышения по высоте и диаметру ствола в процентах, год аттестации (год списания).

Наибольшее количество плюсовых деревьев сосны обыкновенной выделено в Белоярском лесничестве — 71 шт., Маслянинском — 49 шт., Сузунском — 43 шт. Происхождение естественное. Отбор по фенотипу. Селекционная категория — нормальные. Цвет коры темно-серый. Фактура коры трещиноватая.

В Бердском лесничестве количество плюсовых деревьев составляет 26 шт., в Легостаевском — 20 шт. Происхождение естественное. Отбор по фенотипу. Селекционная категория — нормальные. Цвет коры темно-серый. Фактура коры чешуйчатая, трещиноватая.

Количество плюсовых деревьев в Тогучинском лесничестве — 17 шт., в Усть-Хмелевском — 16 шт. Происхождение естественное. Отбор по продуктивности. Селекционная категория — нормальные. Цвет коры темно-серый. Фактура коры трещиноватая.

В Бобровском лесничестве количество плюсовых деревьев составляет 14 шт., в Чингисском — 11 шт. Происхождение естественное. Отбор по фенотипу. Селекционная категория — нормаль-

ные. Цвет коры темно-серый. Фактура коры трещиноватая.

Равное количество отмечено в Гуселетовском и Новосибирском лесничествах — 8 шт. Происхождение естественное. Отбор по фенотипу. Селекционная категория — плюсовое насаждение, нормальные. Цвет коры темно-серый, светло-коричневый. Фактура коры трещиноватая, пластинчатая.

Наименьшее количество аттестованных плюсовых деревьев отмечено в Спириновском — 6 шт. и Коураковском лесничествах — 5 шт. Происхождение естественное, а также лесные культуры. Отбор по фенотипу, по продуктивности. Селекционная категория — нормальные. Цвет коры темно-бурый, темно-серый, пепельно-серый. Фактура коры пластинчатая, трещиноватая.

Установлена тенденция снижения числа плюсовых деревьев сосны обыкновенной: в 1998 г. в реестре объектов числилось свыше 450 шт., в 2007 г. — 401 шт., в 2009 г. — 306 шт., в 2023 г. — 290 шт.

Установлено соотношение лесосеменных объектов на территории Новосибирской обл. и доля участия сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в составе объектов (рис. 2).

Процентное соотношение сосны обыкновенной в объектах лесного семеноводства на территории Новосибирской обл. составляет: плюсовые деревья — 51,4 %; плюсовые насаждения — 24,2 %; лесосеменные плантации — 40,6 %; архивы клонов — 48,1 %; постоянные лесосеменные участки — 25,7 %; испытательные культуры — 71,5 %; географические культуры — 100 %.

После камерального анализа лесоустроительных материалов обследуемого района и оценки наиболее типичных насаждений выполняли закладку ППП.

На ППП выделены деревья различных селекционных категорий: минусовые, нормальные, лучшие нормальные, плюсовые (табл. 2).

Методом перечислительной таксации устанавливали средний диаметр ствола и высоту деревьев. При обработке данных строили график соотношения высоты и диаметра ствола на ППП (рис. 3–5).

На ППП на Орско-Симанском лесохозяйственном участке (квартал 92, выдел 8) диаметр ствола (средний) составил 21,6 см, высота дерева (средняя) — 23,8 м. В квартале 47, выдел 6 средний диаметр ствола равен 20,2 см, средняя высота дерева — 22,5 м. На ППП на Караканском лесохозяйственном участке, квартал 55, выдел 8 средний диаметр ствола — 20,2 см, средняя высота дерева — 22,5 м. Отмечены превышения по диаметру ствола над средними данными по насаждению в древостоях сосны III класса возраста — более 60 %. Это существенно выше, чем в древостоях

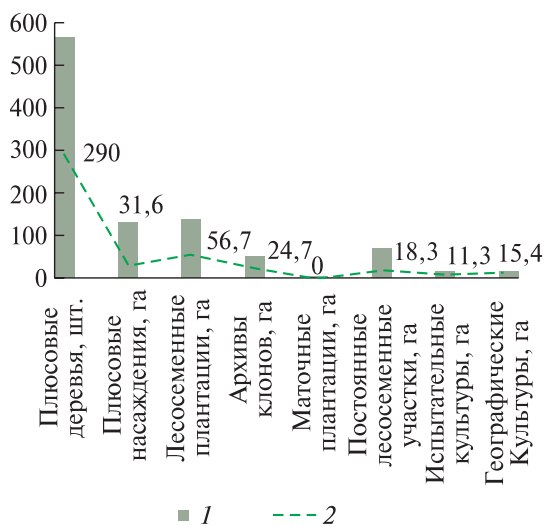


Рис. 2. Доля участия сосны обыкновенной в составе лесосеменных объектов Новосибирской обл. по состоянию на 01.01.2023 г.: 1 — данные по Новосибирской обл.; 2 — доля участия сосны в составе лесосеменных объектов

Fig. 2. Share of Scots pine in forest seed resources in Novosibirsk region as of 01.01.2023: 1 — data for Novosibirsk region; 2 — share of pine in the composition of forest seed objects

Т а б л и ц а 2

Отнесение деревьев к различным селекционным категориям на постоянной пробной площади на Орско-Симанском лесохозяйственном участке Кольванского лесничества, квартал 92, выдел 8

Assignment of trees to different selection categories on a permanent sample area in Orsko-Simansk forestry plot of Kolyvan forestry, quarter 92, section 8

Категория	Доля от среднего значения	Диаметр, см
Минусовые	<0,8	<15
Нормальные	0,8	16
	1,15	23
Лучшие нормальные	1,15	24
	1,3	26
Плюсовые	>1,3	>27

более старшего возраста, неоднократно пройденных рубками.

Квартал 92, выдел 8 Орско-Симанского лесохозяйственного участка характеризуется следующими таксационными показателями: состав 6С4С, возраст 95 лет, средняя высота дерева 24,0 м, средний диаметр ствола 26,0 см, класс бонитета II, полнота 1,0. Происхождение естественное. Тип леса сосняк мшисто-ягодниковый. Тип лесорастительных условий В2 (свежие субори). Рельеф всхолмленный. Санитарное состояние насаждения здоровое.

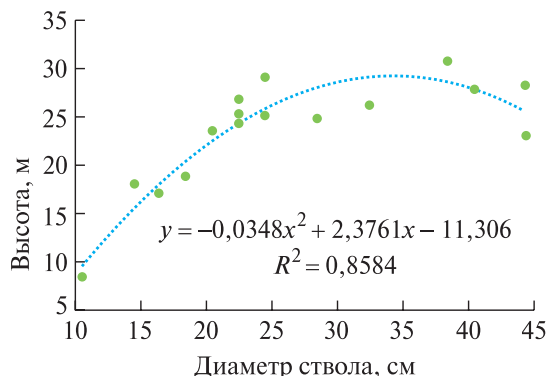


Рис. 3. Зависимость высоты дерева от диаметра ствола на постоянной пробной площади на Орско-Симанском лесохозяйственном участке, квартал 92, выдел 8

Fig. 3. Dependence of tree height on trunk diameter at the permanent sample area at Orsko-Simansky forestry plot, quarter 92, section 8

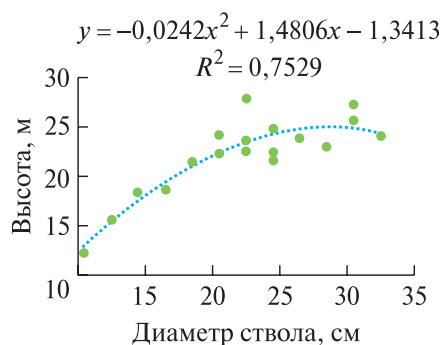


Рис. 4. Зависимость высоты дерева от диаметра ствола на постоянной пробной площади на Орско-Симанском лесохозяйственном участке, квартал 47, выдел 6

Fig. 4. Dependence of tree height on trunk diameter at the permanent sample area at Orsko-Simansky forestry plot, quarter 47, section 6

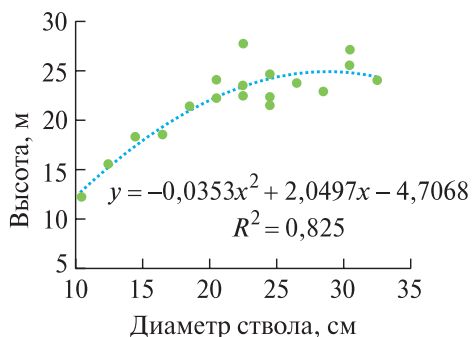


Рис. 5. Зависимость высоты дерева от диаметра ствола на постоянной пробной площади на Караканском лесохозяйственном участке, квартал 55, выдел 8

Fig. 5. Dependence of tree height on trunk diameter on a permanent sample area at Karakan forestry plot, quarter 55, section 8

Квартал 47, выдел 6 Орско-Симанского лесохозяйственного участка характеризуется следующими таксационными показателями: состав 10С, возраст 90 лет, средняя высота дерева 23,6 м, средний диаметр ствола 20,2 см, класс бонитета I,



Рис. 6. Отметка плюсового дерева в натуральных условиях

Fig. 6. Marking of the plus tree in field conditions

полнота 0,9. Происхождение естественное. Тип леса сосняк мшисто-ягодниковый. Тип лесорастительных условий В2 (свежие субори). Подрост 5К4С1Е (благонадежный). В напочвенном покрове преобладает брусника, черника, хвощ. Рельеф всхолмленный. Санитарное состояние насаждения здоровое.

Квартал 55, выдел 8 Караканского лесохозяйственного участка характеризуется следующими таксационными показателями: состав 10С, возраст 80 лет, средняя высота дерева 23,0 м, средний диаметр ствола 20,0 см, класс бонитета II, полнота 0,8. Происхождение естественное. Тип леса сосняк мшисто-ягодниковый. Тип лесорастительных условий В2 (свежие субори). Подрост 10С (благонадежный). В напочвенном покрове преобладает брусника. Рельеф всхолмленный. Санитарное состояние насаждения здоровое.

Выявленные деревья с признаками, удовлетворяющими требованиям плюсовых, отмечали в натуральных условиях: круговую очищали кору и краской наносили полосу шириной 10...15 см. На аттестованных плюсовых деревьях ставили порядковый номер по госреестру и номер по предприятию (рис. 6).

В рамках реализации Программы развития лесосеменных объектов в Новосибирской области на 2019–2039 годы, по результатам обследования постоянно действующей комиссией в 2021 г. отобрано 14 плюсовых деревьев в кварталах 59, 60, 92 Орско-Симанского лесохозяйственного участка Кольванского лесничества. В 2023 г. к аттестации было решено представить 10 плюсовых деревьев в квартале 47 Орско-Симанского лесохозяйственного участка Кольванского лесничества, 10 плюсовых деревьев в квартале 55 на территории Караканского лесохозяйственного участка.

На кандидата в плюсовые деревья заполняли паспорт плюсового дерева в соответствующей форме с указанием таксационных харак-

теристик. При заполнении паспорта визуально и инструментально определяли следующие параметры: средний диаметр кроны, форму кроны (конусовидная, овально-цилиндрическая и т. д.) и ее симметричность, протяженность кроны (в метрах) и относительно высоты ствола (в процентах), густоту облиствления (по градациям глазомерной оценки: густое, среднее, редкое), толщину скелетных ветвей (по градациям: толстые, средние, тонкие), протяженность бессучковой зоны ствола (в метрах) и относительно высоты ствола (в процентах), зарастание отмерших сучьев (по градациям: хорошее, среднее), форму ствола (по градациям: прямизна, полнодревесность), прирост в высоту (по градациям глазомерной оценки: хороший, средний), характеристику коры (окраску, трещиноватость и т. д.), санитарное состояние дерева. Полученные данные сравнивали со средними показателями насаждения, составляли краткую характеристику окружающих деревьев в радиусе 10 м (по породам, селекционной категории, качеству и т. п.).

На основании полученных данных сделано заключение о соответствии изученных объектов требованиям регламентирующих документов, о рекомендациях по дальнейшему их использованию, включая перечень мероприятий по улучшению состояния объектов.

В настоящее время идет подготовка необходимой документации для включения обследованных деревьев в федеральный реестр плюсовых деревьев.

Выводы

Ухудшение состояния и качества селекционно-семеноводческих объектов сосны обыкновенной на территории Новосибирской обл. и сокращение количества плюсовых деревьев на 1/3 за период 1998–2023 гг. произошли вследствие естественного старения, отсутствия мероприятий по своевременному снижению густоты семенных деревьев на лесосеменных плантациях. Кандидаты в плюсовые деревья по диаметру ствола существенно превысили средние значения этого показателя по насаждению (до 60 % и выше) в древостоях сосны III–IV классов возраста, в которых не осуществлялись проходные рубки.

В целях повышения эффективности создания и развития высокопродуктивных древостоев сосны обыкновенной необходимо модифицировать методику отбора плюсовых деревьев, т. е. осуществлять отбор, по возможности, в более раннем возрасте — до начала проходных рубок и проводить работы по отбору лучших деревьев, давать всестороннюю оценку их генетическому потенциалу с последующим использованием для заготовки высококачественных семян.

Список литературы

- [1] Корчагин О.М., Семенов М.А., Вариводина И.Н., Камалов Р.М., Кострикин В.А., Царев В.А., Спицына В.И. Развитие генетико-селекционных методов повышения продуктивности лесов // Лесохозяйственная информация, 2020. № 4. С. 5–22. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2020.4.04
- [2] Kutsenogiy K.P., Makarikova R.P., Milyutin L.I., Naumova N.B., Tarakanov V.V., Chankina O.V. The use of X-ray fluorescence analysis with synchrotron radiation to measure elemental composition of phytomass and soils // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 575, 2007, pp. 214–217.
- [3] Правдин Л.Ф. Сосна обыкновенная (изменчивость, внутривидовая систематика и селекция). М.: Наука, 1964. 189 с.
- [4] Раевский Б.В., Куклина К.К., Щурова М.Л. Селекционно-генетическая оценка плюсовых деревьев сосны обыкновенной в Карелии // Труды Карельского научного центра РАН, 2020. № 3. С. 45–59.
- [5] Сухоруких Ю.И. Критерии отбора плюсовых деревьев для защитного лесоразведения // Новые технологии / New technologies, 2023. Т. 19. № 1. С. 69–79. <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2023-19-1-69-79>
- [6] Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П., Горелов А.Н. Рост клонов плюсовых деревьев сосны обыкновенной, отобранных в Нижегородской области по смолопродуктивности // Лесной вестник, 2021. Т. 25. № 4. С. 5–14. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-4-5-14
- [7] Горелов А.Н., Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П. Таксационные показатели испытательных культур сосны обыкновенной в Нижегородской области // Актуальные проблемы лесного комплекса, 2020. № 58. С. 87–90.
- [8] Fedorkov A., Andersson Gull B., Persson T., Mullin T.J. Longitudinal differences in scots pine shoot elongation // Silva Fennica, 2018, t. 52, no. 5, p. 10040.
- [9] Кузьмин С.Р., Кузьмина Н.А. Отбор перспективных климатипов сосны обыкновенной в географических культурах разных лесорастительных условий // Лесоведение, 2020. № 5. С. 451–465.
- [10] Чеботько Н.К., Крекова Я.А., Бейсенбай А.Б., Шарипова А.К. Оценка клонового потомства плюсовых деревьев сосны обыкновенной на севере Казахского мелкосопочника // 3I: Intellect, Idea, Innovation — интеллект, идея, инновация, 2022. № 4. С. 212–221.
- [11] Горелов А.Н. Параметры плюсовых деревьев сосны обыкновенной на лесосеменной плантации в Нижегородской области // Роль аграрной науки в развитии лесного и сельского хозяйства Дальнего Востока: Материалы V Междунар. науч.-практ. конф. В 3 ч. / под ред. И.И. Бородина. Усурийск: Изд-во Приморской ГСХА, 2021. С. 44–52.
- [12] Демиденко В.П., Тараканов В.В. Сравнительная оценка интенсивности роста 20-летних потомств плюсовых деревьев сосны в Новосибирской области // Лесное хозяйство, 2008. № 5. С. 36–37.
- [13] Царев А.П., Лаур Н.В. Лесные плюсовые насаждения и критерии их отбора // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада, 2019. № 13. С. 79–86.
- [14] Царев А.П., Лаур Н.В. Из истории развития лесной селекции в Республике Карелия // Наука — лесному хозяйству севера: сб. науч. тр. ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства» / под ред. Н.А. Демидовой. Архангельск: СевНИИЛХ, 2019. С. 114–120.

- [15] Нарзьев В.В., Шенмайер Н.А., Дырдин С.Н., Иванов А.С. Изменчивость полусибиров плюсовых деревьев сосны кедровой сибирской новосибирского происхождения в условиях дендрария СибГУ // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений, 2018. Т. 21. С. 159–161.
- [16] Тараканов В.В., Демиденко В.П., Ишутин Я.Н., Бушков Н.Т. Селекционное семеноводство сосны обыкновенной в Сибири. Новосибирск: Наука, 2001. 230 с.
- [17] Рязанова Е.К., Тараканов В.В. Анализ дифференциации климатипов сосны обыкновенной в географических культурах Сузунского лесничества Новосибирской области по данным 2006 (Роговцев и др., 2008) и 2020 гг. // Теория и практика современной аграрной науки: сб. V национальной (Всероссийской) науч. конф. с междунар. участием. Новосибирск: Золотой колос, 2022. С. 446–450.
- [18] Милютин Л.И. Анализ современного состояния отечественной лесной селекции // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений. 2019. Т. 22. С. 130–132.
- [19] Распоряжение Правительства Российской Федерации от 11 февраля 2021 года № 312-р «Об утверждении Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года». URL: <https://docs.cntd.ru/document/573658653> (дата обращения 30.10.2023).
- [20] Бессчетнова Н.Н. Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.). Эффективность отбора плюсовых деревьев. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородской ГСХА, 2016. 464 с.
- [21] Бессчетнова Н.Н. Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.). Репродуктивный потенциал плюсовых деревьев. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородской ГСХА, 2015. 586 с.
- [22] Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П., Оганян Т.А. Таксационные показатели вегетативного потомства плюсовых деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в архивах клонов в Нижегородской области // Экономические аспекты развития агропромышленного комплекса и лесного хозяйства. Лесное хозяйство Союзного государства России и Белоруссии: Матер. Междунар. науч.-практ. конф., Нижний Новгород, 26 сентября 2019 г. / под ред. Н.Н. Бессчетновой. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородской ГСХА, 2019. С. 115–122.
- [23] Krakau U.-K., Liesebach M., Aronen T., Lelu-Walter M.A., Schneck V. Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) // Forest Tree Breeding in Europe: Current State-of-the-Art and Perspectives. Managing Forest Ecosystems, 2013, v. 25, part. 4, pp. 267–323. DOI: 10.1007/978-94-007-6146-9_6
- [24] Zerbe S., Wirth P. Non-indigenous plant species and their ecological range in Central European pine (*Pinus sylvestris* L.) forests // Annals of Forest Science, 2006, v. 63, no. 2, pp. 189–203. DOI: 10.1051/forest:2005111
- [25] Крылов Г.В. Леса Западной Сибири. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 255 с.
- [26] Вересин М.М. Лесное семеноводство. М.: Гослесбуиздат, 1963. 160 с.
- [27] Молотков П.И. Селекция лесных пород. М.: Лесная пром-сть, 1982. 223 с.
- [28] Проказин А.Е. Перспективы использования достижений лесной генетики, селекции и семеноводства для повышения продуктивности лесов и плантационного лесоразведения // Лесохозяйственная информация, 2008. № 6–7. С. 21–26.
- [29] Ткаченко М.Е. Общее лесоводство. М.: Гослесбуиздат, 1955. 600 с.
- [30] Видякин А.И. Эффективность плюсовой селекции древесных растений // Хвойные бореальной зоны, 2010. XXVII. № 1–2. С. 18–24.
- [31] Указания по лесному семеноводству в Российской Федерации. М.: ВНИИЦлесресурс, 2000. 198 с.
- [32] Путенихин В.П., Фарушкина Г.Г. Методы сохранения генетической гетерогенности при создании искусственных «популяций» лесообразующих видов // Хвойные бореальной зоны, 2007. XXIV. № 2–3.
- [33] Маркова И.А. Современные проблемы лесовыращивания (Лесокультурное производство). СПб.: Изд-во СПбГЛТА, 2008. 152 с.
- [34] Матвеева Р.Н., Буторова О.Ф., Братилова Н.П. Изменчивость показателей роста и генеративного развития кедровых сосен на плантации зеленой зоны города Красноярска // Сибирский лесной журнал, 2014. № 2. С. 81–86.
- [35] Лесной кодекс Российской Федерации от 04.12.2006 № 200-ФЗ (ред. от 04.08.2023) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.09.2023). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299/ (дата обращения 30.10.2023).
- [36] О внесении изменений в Федеральный закон «О семеноводстве» и отдельные законодательные акты Российской Федерации (с изменениями и дополнениями). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1302361599?marker> (дата обращения 30.10.2023).
- [37] Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации «Об утверждении правил создания и выделения объектов лесного семеноводства» от 20.10.2015 г. № 438. URL: <http://docs.cntd.ru/document/420314538> (дата обращения 30.10.2023).
- [38] Лесоустроительная инструкция: приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации «Об утверждении Лесоустроительной инструкции» от 5 августа 2022 года № 510. URL: <https://docs.cntd.ru/document/351878696> (дата обращения 30.10.2023).
- [39] ОСТ 56-69–83 Площади пробные лесоустроительные. Метод закладки. М.: Госкомплеск СССР, 1983.
- [40] Основные положения по лесному семеноводству в Российской Федерации. М.: Изд-во ВНИИЦлесресурс, 1994. 24 с.
- [41] Осипенко А.Е., Осипенко Р.А., Залесов С.В. Возрастная структура сосновых древостоев в Алтае-Новосибирском районе лесостепей и ленточных боров // Лесохозяйственная информация, 2020. № 3. С. 89–100. DOI 10.24419/LNI.2304-3083.2020.3.08
- [42] Ирошников А.И., Мамаев С.А., Правдин Л.Ф., Щербакова М.А. Методика изучения внутривидовой изменчивости древесных пород. М.: Изд-во Госкомлесхоза, 1973. 31 с.

Сведения об авторах

Третьякова Раиса Алексеевна — аспирант, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный аграрный университет», rtretyakova@yandex.ru

Паркина Оксана Валерьевна [✉] — канд. с.-х. наук, зав. кафедрой лесного хозяйства, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный аграрный университет», Parkinaoksana@yandex.ru

Роговцев Роман Владимирович — нач. отдела «Новосибирская лесосеменная станция», Филиал ФБУ «Рослесозащита» – «ЦЗЛ Новосибирской области», rvr79@mail.ru

Якубенко Ольга Евгеньевна — канд. с.-х. наук, доцент кафедры лесного хозяйства, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный аграрный университет», o.e.yakubenko@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.03.2024.

Одобрено после рецензирования 15.07.2024.

Принята к публикации 22.08.2024.

PLUS PINE (*PINUS SYLVESTRIS* L.) TREES EVALUATION

R.A. Tretyakova¹, O.V. Parkina^{1✉}, R.V. Rogovtsev², O.E. Yakubenko¹

¹Novosibirsk State Agrarian University, 160, Dobrolyubova st., 630039, Novosibirsk, Russia

²Branch of FBU «Roslesozaschita» – Forest Protection Center of the Novosibirsk Region, 221, Gogolya st., 630015, Novosibirsk, Russia

Parkinaoksana@yandex.ru

The main selection features of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) plus trees in the Novosibirsk region are considered. The ecological, environment-forming and economic significance of the breed is noted. The share of Scots pine in the composition of forest seed objects is presented, and the change for the period from 2008 to 2023 is determined. It has been established that in order to increase the productivity and quality of tree stands, it is necessary to carry out work on the selection of the best trees and a comprehensive assessment of their genetic potential with subsequent use for the procurement of high-quality seed raw materials. Between 2021 and 2023 a selection of plus trees was carried out on the territory of the Kolyvan forestry of the Orsko-Simansky forestry area and the Ordynsky forestry of the Karakansky forestry area of the Novosibirsk region. The objects of study during the selection were stands of Scots pine of age class III that were not affected by felling. It is characteristic that the excess of trunk diameter over the average for the stand in pine stands of age class III is more than 60 %. This is significantly higher than in older forest stands that have been repeatedly felled. Promising directions for the development of pine forest seed objects in the Novosibirsk region have been identified and proposed.

Keywords: Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), plantings, plus tree, taxation indicators, forest seed objects

Suggested citation: Tretyakova R.A., Parkina O.V., Rogovtsev R.V., Yakubenko O.E. *Otsenka plusovykh derev'ev sosny obyknovennoy (Pinus sylvestris L.)* [Plus pine (*Pinus sylvestris* L.) trees evaluation]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 5, pp. 83–93. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-83-93

References

- [1] Korchagin O.M., Semenov M.A., Varivodina I.N., Kamalov R.M., Kostrikin V.A., Tsarev V.A., Spitsyna V.I. *Razvitie genetiko-selektionnykh metodov povysheniya produktivnosti lesov* [Development of genetic and selection methods to increase forest productivity]. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information], 2020, no. 4, pp. 5–22. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2020.4.04
- [2] Kutsenogiy K.P., Makarikova R.P., Milyutin L.I., Naumova N.B., Tarakanov V.V., Chankina O.V. The use of X-ray fluorescence analysis with synchrotron radiation to measure elemental composition of phytomass and soils. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 575, 2007, pp. 214–217.
- [3] Pravdin L.F. *Sosna obyknovennaya (izmenchivost', vnutrividovaya sistematika i selektsiya)* [Scots pine (variability, intraspecific systematics and selection)]. Moscow: Nauka, 1964, 189 p.
- [4] Raevskiy B.V., Kuklina K.K., Shchurova M.L. *Selektsionno-geneticheskaya otsenka plusovykh derev'ev sosny obyknovennoy v Karelii* [Selection and genetic assessment of plus trees of Scots pine in Karelia]. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Transactions of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences], 2020, no. 3, pp. 45–59.
- [5] Sukhorukikh Yu.I. *Kriterii otbora plusovykh derev'ev dlya zashchitnogo lesorazvedeniya* [Criteria for the selection of plus trees for protective afforestation]. *Novye tekhnologii / New technologies* [New technologies], 2023, v. 19, no. 1, pp. 69–79. <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2023-19-1-69-79>
- [6] Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Gorelov A.N. *Rost klonov plusovykh derev'ev sosny obyknovennoy, otobrannykh v Nizhegorodskoy oblasti po smoloproduktivnosti* [Growth of Scots pine plus trees clones, selected by resin productivity in Nizhny Novgorod region]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 4, pp. 5–14. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-4-5-14

- [7] Gorelov A.N., Besschetnova N.N., Besschetnov V.P. *Taksatsionnye pokazateli ispytatel'nykh kul'tur sosny obyknovennoy v Nizhegorodskoy oblasti* [Taxation indicators of test crops of Scots pine in the Nizhny Novgorod region]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex], 2020, no. 58, pp. 87–90.
- [8] Fedorkov A., Andersson Gull B., Persson T., Mullin T.J. Longitudinal differences in scots pine shoot elongation. *Silva Fennica*, 2018, t. 52, no. 5, p. 10040.
- [9] Kuz'min S.R., Kuz'mina N.A. *Otbor perspektivnykh klimatipov sosny obyknovennoy v geograficheskikh kul'turakh raznykh lesorastitel'nykh usloviy* [Selection of promising climatypes of Scots pine in geographical cultures of different forest growth conditions]. *Lesovedenie*, 2020, no. 5, pp. 451–465.
- [10] Chebot'ko N.K., Krekova Ya.A., Beysenbay A.B., Sharipova A.K. *Otsenka klonovogo potomstva plusovykh derev'ev sosny obyknovennoy na severe Kazakhskogo melkosopochnika* [Evaluation of clonal progeny of plus trees of Scots pine in the north of the Kazakh upland]. 3I: Intellect, Idea, Innovation — intellekt, ideya, innovatsiya [3I: Intellect, Idea, Innovation — intelligence, idea, innovation], 2022, no. 4, pp. 212–221.
- [11] Gorelov A.N. *Parametry plusovykh derev'ev sosny obyknovennoy na lesosemennoy plantatsii v Nizhegorodskoy oblasti* [Parameters of plus trees of Scots pine on a forest seed plantation in the Nizhny Novgorod region]. *Rol' agrarnoy nauki v razvitiy lesnogo i sel'skogo khozyaystva Dal'nego Vostoka: Materialy V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [The role of agricultural science in the development of forestry and agriculture in the Far East: Proceedings of the V International scientific and practical conference]. In 3 parts. Ed. I.I. Borodin. Ussuriysk: Primorskaya State Agricultural Academy, 2021, pp. 44–52.
- [12] Demidenko V.P., Tarakanov V.V. *Sravnitel'naya otsenka intensivnosti rosta 20-letnikh potomstv plusovykh derev'ev sosny v Novosibirskoy oblasti* [Comparative assessment of the growth intensity of 20-year-old progenies of plus pine trees in the Novosibirsk region]. *Lesnoe khozyaystvo* [Forestry], 2008, no. 5, pp. 36–37.
- [13] Tsarev A.P., Laur N.V. *Lesnye plusovyye nasazhdeniya i kriterii ikh otbora* [Plus forest stands and criteria for their selection]. *Byulleten' Gosudarstvennogo Nikitskogo botanicheskogo sada* [Bulletin of the State Nikitsky Botanical Garden], 2019, no. 13, pp. 79–86.
- [14] Tsarev A.P., Laur N.V. *Iz istorii razvitiya lesnoy seleksii v Respublike Kareliya* [From the history of the development of forest selection in the Republic of Karelia]. *Nauka — lesnomu khozyaystvu severa: Sb. nauchnykh trudov FBU «Severnyy nauchno-issledovatel'skiy institut lesnogo khozyaystva»* [Science for northern forestry: collection of scientific papers of the Federal State Budgetary Institution «Northern Forestry Research Institute»]. Ed. N.A. Demidova. Arkhangel'sk: SevNIILH, 2019, pp. 114–120.
- [15] Narzyaev V.V., Shenmayer N.A., Dyrdin S.N., Ivanov A.S. *Izmenchivost' plusovykh derev'ev sosny kedrovoy sibirskoy novosibirskogo proiskhozhdeniya v usloviyakh dendrariya SibGU* [Variability of half-sibs of plus trees of Siberian stone pine of Novosibirsk origin in the conditions of the Siberian State University arboretum]. *Plodovodstvo, semenovodstvo, introduktsiya drevesnykh rasteniy* [Fruit growing, seed production, introduction of woody plants], 2018, v. 21, pp. 159–161.
- [16] Tarakanov V.V., Demidenko V.P., Ishutin Ya.N., Bushkov N.T. *Seleksionnoe semenovodstvo sosny obyknovennoy v Sibiri* [Selection seed production of Scots pine in Siberia]. Novosibirsk: Nauka, 2001, 230 p.
- [17] Ryazanova E.K., Tarakanov V.V. *Analiz differentsiatsii klimatipov sosny obyknovennoy v geograficheskikh kul'turakh Suzunskogo lesnichestva Novosibirskoy oblasti po dannym 2006 (Rogovtsev i dr., 2008) i 2020 gg.* [Analysis of differentiation of Scots pine climatypes in geographical crops of the Suzunsky forestry of the Novosibirsk region according to data from 2006 (Rogovtsev et al., 2008) and 2020]. *Teoriya i praktika sovremennoy agrarnoy nauki: Sb. V natsional'noy (Vserossiyskoy) nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Theory and practice of modern agricultural science: collection of papers of the V national (All-Russian) scientific conference with international participation]. Novosibirsk: Zolotoy Kolos, 2022, pp. 446–450.
- [18] Milyutin L.I. *Analiz sovremennogo sostoyaniya otechestvennoy lesnoy seleksii* [Analysis of the current state of domestic forest selection]. *Plodovodstvo, semenovodstvo, introduktsiya drevesnykh rasteniy* [Fruit growing, seed production, introduction of woody plants], 2019, v. 22, pp. 130–132.
- [19] *Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 11 fevralya 2021 goda № 312-r «Ob utverzhdenii Strategii razvitiya lesnogo kompleksa Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda»* [Order of the Government of the Russian Federation dated February 11, 2021 no. 312-r «On approval of the Strategy for the development of the forest complex of the Russian Federation until 2030»]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/573658653> (accessed 30.10.2023).
- [20] Besschetnova N.N. *Sosna obyknovennaya (Pinus sylvestris L.). Effektivnost' otbora plusovykh derev'ev* [Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). Efficiency of plus trees selection]. Nizhny Novgorod: Nizhniy Novgorod: Nizhegorodskaya GSKhA [Nizhny Novgorod State Agricultural Academy], 2016, 464 p.
- [21] Besschetnova N.N. *Sosna obyknovennaya (Pinus sylvestris L.). Reprodukivnyy potentsial plusovykh derev'ev* [Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). Reproductive potential of plus trees]. Nizhny Novgorod: Nizhegorodskaya GSKhA [Nizhny Novgorod State Agricultural Academy], 2015, 586 p.
- [22] Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Oganyan T.A. *Taksatsionnye pokazateli vegetativnogo potomstva plusovykh derev'ev sosny obyknovennoy (Pinus sylvestris L.) v arkhivakh klonov v Nizhegorodskoy oblasti* [Taxation indicators of vegetative progeny of plus trees of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in clone archives in the Nizhny Novgorod region]. *Ekonomicheskie aspekty razvitiya agropromyshlennogo kompleksa i lesnogo khozyaystva. Lesnoe khozyaystvo Soyuznogo gosudarstva Rossii i Belorussii: mater. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Economic aspects of development of the agro-industrial complex and forestry. Forestry of the Union State of Russia and Belarus: proc. Int. scientific-practical. conf.], Nizhny Novgorod, September 26, 2019. Ed. N.N. Besschetnova. Nizhny Novgorod: [Publishing house of NGSKhA], 2019, pp. 115–122.
- [23] Krakau U.-K., Liesebach M., Aronen T., Lelu-Walter M.A., Schneck V. Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Forest Tree Breeding in Europe: Current State-of-the-Art and Perspectives*. *Managing Forest Ecosystems*, 2013, v. 25, part. 4, pp. 267–323. DOI: 10.1007/978-94-007-6146-9_6
- [24] Zerbe S., Wirth P. Non-indigenous plant species and their ecological range in Central European pine (*Pinus sylvestris* L.) forests. *Annals of Forest Science*, 2006, v. 63, no. 2, pp. 189–203. DOI: 10.1051/forest:2005111
- [25] Krylov G.V. *Lesy Zapadnoy Sibiri* [Forests of Western Siberia]. Moscow: Izd-vo AN SSSR [Publishing house of the USSR Academy of Sciences], 1961, 255 p.
- [26] Veresin M.M. *Lesnoe semenovodstvo* [Forest seed production]. Moscow: Goslesbumizdat, 1963, 160 p.

- [27] Molotkov P.I. *Seleksiya lesnykh porod* [Breeding of forest species]. Moscow: Lesnaya Promyshlennost, 1982, 223 p.
- [28] Prokazin A.E. *Perspektivy ispol'zovaniya dostizheniy lesnoy genetiki, seleksii i semenovodstva dlya povysheniya produktivnosti lesov i plantatsionnogo lesorazvedeniya* [Prospects for using achievements of forest genetics, breeding and seed production to increase forest productivity and plantation afforestation]. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information], 2008, no. 6–7, pp. 21–26.
- [29] Tkachenko M.E. *Obshchee lesovodstvo* [General forestry]. Moscow: Goslesbumizdat, 1955, 600 p.
- [30] Vidyakin A.I. *Effektivnost' plusovoy seleksii drevesnykh rasteniy* [Efficiency of plus breeding of woody plants]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Conifers of the boreal zone], XXVII, no. 1–2, 2010, pp. 18–24.
- [31] *Ukazaniya po lesnomu semenovodstvu v Rossiyskoy Federatsii* [Guidelines for forest seed production in the Russian Federation]. Moscow: VNIITSlesresurs, 2000, 198 p.
- [32] Putenikhin V.P., Farukhshina G.G. *Metody sokhraneniya geneticheskoy geterogenosti pri sozdaniy iskusstvennykh «populyatsiy» lesoobrazuyushchikh vidov* [Methods for preserving genetic heterogeneity when creating artificial «populations» of forest-forming species]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Conifers of the boreal zone], 2007, t. XXIV, no. 2–3.
- [33] Markova I.A. *Sovremennye problemy lesovyrashchivaniya (Lesokul'turnoe proizvodstvo)* [Modern problems of forest cultivation (Forestry production)]. St. Petersburg: SPbGLTA, 2008, 152 p.
- [34] Matveeva R.N., Butorova O.F., Bratilova N.P. *Izmenchivost' pokazateley rosta i generativnogo razvitiya kedrovyykh sosen na plantatsii zelenoy zony goroda Krasnoyarska* [Variability of growth indicators and generative development of cedar pines on a plantation of the green zone of the city of Krasnoyarsk]. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* [Siberian Forestry J.], 2014, no. 2, pp. 81–86.
- [35] *Lesnoy kodeks Rossiyskoy Federatsii ot 04.12.2006 № 200-FZ (red. ot 04.08.2023) (s izm. i dop., vstup. v silu s 01.09.2023)* [Forest Code of the Russian Federation of 04.12.2006 no. 200-FZ (as amended on 04.08.2023) (as amended and supplemented, entered into force on 01.09.2023)]. Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299/ (accessed 30.10.2023).
- [36] *O vnesenii izmeneniy v Federal'nyy zakon «O semenovodstve» i ot del'nye zakonodatel'nye akty Rossiyskoy Federatsii (s izmeneniyami i dopolneniyami)* [On Amendments to the Federal Law «On Seed Production» and Certain Legislative Acts of the Russian Federation (as amended and supplemented)]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1302361599?marker> (accessed 30.10.2023).
- [37] *Prikaz Ministerstva prirodnykh resursov i ekologii RF «Ob utverzhdenii pravil sozdaniya i vydeleniya ob'ektov lesnogo semenovodstva» ot 20.10.2015 g. № 438* [Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation «On approval of the rules for the creation and allocation of forest seed production facilities» dated 20.10.2015 no. 438]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/420314538> (accessed 30.10.2023).
- [38] *Lesoustroitel'naya instruktsiya: Prikaz Ministerstva prirodnykh resursov i ekologii RF «Ob utverzhdenii Lesoustroitel'noy instruktsii» ot 5 avgusta 2022 goda № 510* [Forest management instructions: Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation «On approval of the Forest Management Instructions» dated 5 August 2022 no. 510]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/351878696> (accessed 30.10.2023).
- [39] *OST 56-69-83 Ploshchadi probnye lesoustroitel'nye. Metod zakladki* [OST 56-69-83 Forest management trial areas. Bookmarking method]. Moscow: Goskompleks SSSR, 1983.
- [40] *Osnovnye polozheniya po lesnomu semenovodstvu v Rossiyskoy Federatsii* [Basic provisions on forest seed production in the Russian Federation]. Moscow: VNIITSlesresurs, 1994. 24 p.
- [41] Osipenko A.E., Osipenko R.A., Zalesov S.V. *Vozrastnaya struktura sosnovyykh drevostoev v Altae-Novosibirskom rayone lesostepey i lentochnykh borov* [Age structure of pine stands in the Altai-Novosibirsk region of forest-steppes and ribbon pine forests]. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information], 2020, no. 3, pp. 89–100. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2020.3.08
- [42] Iroshnikov A.I., Mamaev S.A., Pravdin L.F., Shcherbakova M.A. *Metodika izucheniya vnutrividovoy izmenchivosti drevesnykh porod* [Methodology for studying intraspecific variability of tree species]. Moscow: State Committee for Forestry of the Council of Ministers of the USSR. Center. Research Institute of Forest Genetics and Breeding (NIILGiS), 1973. 31 p.

Authors' information

Tret'yakova Raisa Alekseevna — pg. of the Novosibirsk State Agrarian University, rtreyakova@yandex.ru

Parkina Oksana Valer'evna — Cand. Sci. (Agriculture), Head of the Department of Forestry of the Novosibirsk State Agrarian University, Parkinaoksana@yandex.ru

Rogovtsev Roman Vladimirovich — Head of the Department of «Novosibirsk Seed Centre», Branch of FBU «Roslesozaschita» — Forest Protection Center of the Novosibirsk Region, rvr79@mail.ru

Yakubenko Ol'ga Evgen'evna — Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor of the Department of Forestry of the Novosibirsk State Agrarian University, o.e.yakubenko@yandex.ru

Received 18.03.2024.

Approved after review 15.07.2024.

Accepted for publication 22.08.2024.

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 РЕГЕНЕРАЦИИ И УКОРЕНЕНИЯ СОРТОВ КРЫЖОВНИКА ОБЫКНОВЕННОГО *RIBES UVA-CRISPA* L. В КУЛЬТУРЕ *IN VITRO*

И.Л. Крахмалева✉, О.В. Королева, О.И. Молканова

ФГБУН «Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина Российской академии наук» (ГБС РАН), 127276, Москва, Ботаническая ул., д. 4

seglogy@bk.ru

Статья посвящена оптимизации составов питательных сред на этапах собственно микроразмножения и укоренения перспективных сортов крыжовника обыкновенного (*Ribes uva-crispa* L.). Исследования проводили в 2022 г. в лаборатории биотехнологии растений Главного ботанического сада им. Н.В. Цицина Российской академии наук. В качестве объектов использовали сорта: 'Берилл', 'Грушенька', 'Ксения' и 'Черносливовый'. Определено влияние хелатных форм железа (Fe(III)-EDDHA и Fe(III)-EDTA) на морфогенетические показатели и развитие микропобегов крыжовника. Установлено, что на этапе собственно микроразмножения добавление 100 мг/л хелата Fe(III)-EDDHA в питательную среду Quorin and Leroivte увеличивало высоту микропобегов исследуемых сортов. Число микропобегов, пригодных для дальнейшего укоренения (высотой 10 мм и выше), на средах с 100 мг/л Fe(III)-EDDHA составило от 20 до 37 %, по сравнению со средой с 36,7 мг/л Fe(III)-EDTA — от 10 до 16 %. Выявлено, что наибольшим морфогенетическим потенциалом характеризовался сорт 'Черносливовый', у которого коэффициент размножения был больше в 1,4–2,1 раза, чем у других сортов. Установлено, что на укореняемость и морфометрические параметры корневой системы влияли сортовые особенности крыжовника, тип и концентрация ауксинов в питательной среде 1/2 Murashige and Skoog. Показано, что использование питательных сред с 0,5...1,5 мг/л индолил-3-масляной кислоты способствовало образованию большего числа корней, а с 0,5...1,5 мг/л индолил-3-уксусной кислоты увеличивало их длину. Установлено, что использование питательной среды с добавлением 0,5 мг/л индолил-3-масляной кислоты было наиболее эффективным для укоренения большинства исследуемых сортов.

Ключевые слова: крыжовник обыкновенный *Ribes uva-crispa* L., клональное микроразмножение, коэффициент размножения, ризогенез

Ссылка для цитирования: Крахмалева И.Л., Королева О.В., Молканова О.И. Особенности регенерации и укоренения сортов крыжовника обыкновенного *Ribes uva-crispa* L. в культуре *in vitro* // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 5. С. 94–103. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-94-103

Плодово-ягодные культуры имеют большое сельскохозяйственное и экономическое значение. Включение ягод и фруктов в рацион питания обеспечивает организм человека необходимыми для него антиоксидантами, каротиноидами, фенольными соединениями, сахарами, кислотами и др. [1].

Ценной ягодной культурой, представляющей коммерческий интерес, является крыжовник обыкновенный (*Ribes uva-crispa* L.) семейства Крыжовниковые (Grossulariaceae DC.). Его плоды характеризуются высоким содержанием белков, антоцианов, углеводов, сахаров (преобладают моносахариды), клетчатки, витаминов (А, В₁, В₂, В₃, В₆, В₉, С, Е), Р-активных и пектиновых веществ. Кроме этого, в плодах содержатся такие элементы, как калий, магний, натрий, кальций, фосфор и др. [2, 3]. Плоды крыжовника являются естественным источником органических кислот, в них в равных соотношениях содержатся лимонная и яблочная кислоты [4]. Основными антиоксидантами в ягодах служат р-кумаровая кислота,

кемпферол и гликозиды изораметина, цианидина, кверцетина [5, 6]. Такой ценный химический состав ягод крыжовника очень полезен для употребления в свежем виде. Однако их в различной степени зрелости используют и для переработки, сушки, заморозки, приготовления различных напитков и в виноделии [7]. Благодаря значительному содержанию пектинов крыжовник применяется в кондитерской промышленности [8]. Масло косточек крыжовника, полученное при его переработке, содержит токохроманолы (69,13 мг /100 г), что обеспечивает производство новых продуктов, богатых витамином Е, в частности в фармацевтической и косметической промышленности [9].

Сок крыжовника отличается антибактериальной активностью в отношении штаммов бактерий, вызывающих заболевание под названием акне (*Staphylococcus aureus* и *S. epidermidis*), удаляет до 91 % свободных радикалов [10]. Метанольные экстракты из плодов крыжовника характеризуются противогрибковыми свойствами в отношении штаммов *Candida glabrata* и *C. lipolytica* [11].

Крыжовник — это ягодный кустарник, трудно поддающийся размножению традиционными способами, что обусловило развитие производства качественного посадочного материала перспективных сортов крыжовника, ускорению которого значительно способствует применение биотехнологических методов размножения [12]. Исследования по микроразмножению крыжовника проводятся как российскими, так и зарубежными учеными. Крыжовник с трудом размножается в условиях *in vitro* в связи с высокой гетерогенностью сортов, влияющий на образование и развитие микропобегов. При культивировании образуются конгломераты мелких микропобегов, появляются оводненные экспланты, развиваются некроз и пожелтение листьев [13–15]. Изучению особенностей ризогенеза крыжовника в культуре *in vitro* посвящены лишь единичные работы [16, 17].

Известно, что эффективность клонального микроразмножения растений в значительной степени зависит от состава питательной среды. В частности железо необходимо для нормального роста и развития как важный микроэлемент, участвующий в процессах фотосинтеза и дыхания, в метаболических реакциях, происходящих в клетках растений, особенно в биосинтезе хлорофилла, поэтому при дефиците железа существенно замедляется рост растений и возникает вероятность развития хлороза. Железо используется в виде хелатов $\text{FeSO}_4 + \text{EDTA}$ (этилендиаминтетрауксусная кислота) или ее динатриевой соли Na_2EDTA (трилон Б). При этом в среде $\text{FeSO}_4 + \text{EDTA}$ может выпадать в осадок, что снижает его биодоступность и обеспечивает образование соединений, ингибирующих рост растений [18, 19]. Хелат железа Fe(III)-EDDHA более фотостабилен, чем хелат Fe(III)-EDTA , в широком диапазоне кислотности вследствие его низкого окислительно-восстановительного потенциала [20]. Таким образом, использование стабильных форм железа при культивировании *in vitro* увеличивает его доступность. Замена Fe(III)-EDTA на Fe(III)-EDDHA показала положительное влияние на микроразмножение и укоренение растений различных таксономических групп, в частности сортов *Rubus idaeus* L. [21], *Corylus avellana* L. × *C. americana* M. сорта 'Geneva' [22], сортов *Syringa* L. [23] и *Phoenix dactylifera* L. [24].

Цель работы

Цель работы — оптимизация состава питательных сред на этапах собственно микроразмножения и укоренения сортов крыжовника.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились в лаборатории биотехнологии растений ФГБУН «Главный ботани-

ческий сад им. Н.В. Цицина Российской академии наук» (ГБС РАН). В качестве объектов использовали сорта крыжовника 'Грушенька', 'Берилл', 'Ксения' и 'Черносливовый'.

Методика биотехнологических исследований изолированных тканей и органов растений основывалась на общепринятых классических приемах [25], усовершенствованных в лаборатории биотехнологии растений ГБС РАН [26].

На этапе собственно микроразмножения использовали питательную среду Quorin and Lepointe (QL) [27] с добавлением 0,3 мг/л 6-бензиламинопурина (6-БАП) (Sigma, США) и различных форм хелата железа: 36,7 мг/л Fe(III)-EDTA (контрольный вариант) и 100 мг/л Fe(III)-EDDHA . Через 30 сут. культивирования определяли морфометрические показатели эксплантов (число и высоту микропобегов) и на основе этого рассчитывали коэффициент размножения (как количество микропобегов, полученных за одно субкультивирование с одного экспланта). По высоте образовавшиеся микропобеги были условно разделены на три группы: низкие (от 3 до 5 мм), средние (от 6 до 9 мм) и высокие (от 10 мм и выше).

На этапе укоренения использовали питательную среду 1/2 Murashige and Skoog (1/2 MS, 1962) [28] с добавлением индолил-3-масляной (ИМК) (Sigma, США) и индолил-3-уксусной (ИУК) кислот (Serva, Германия) в концентрациях 0,5, 1,0 и 1,5 мг/л соответственно. В качестве контрольного варианта использовали питательную среду 1/2 MS без добавления ауксинов (Б/Г). Через 14 и 21 сут. культивирования учитывали развитие корневой системы (число корней и их длину), подсчитывали число укоренившихся микропобегов и затем на основе этого рассчитывали процент укоренения.

Условия культивирования эксплантов: освещенность 1500...2000 лк, фотопериод 16 ч, температура 23 ± 2 °С. Опыт проводился в трехкратной повторности, по 10 эксплантов в каждой. Статистическую обработку полученных данных проводили согласно общепринятым методам с использованием программ PAST 2.17c (Paleontological Statistics) и Microsoft Office Excel 2010. В таблицах и графиках представлены средние значения и их стандартные ошибки (\pm).

Результаты и обсуждение

Особенности клонального микроразмножения тесно связаны с биологическими особенностями исходных растений. В культуре *in vitro* регенерация микропобегов зависит от сортовых особенностей, состава питательной среды, размера экспланта и условий культивирования [26, 28].

При культивировании эксплантов крыжовника для большинства сортов свойственно образование

Т а б л и ц а 1

Морфометрические параметры сортов крыжовника на этапе собственно микроразмножения на питательной среде QL с разной формой железа

Morphometric parameters of gooseberry cultivars on QL medium with different iron forms at the multiplication stage

Сорт	Форма хелата железа	Высота микропобегов, мм	Число микропобегов, шт.	Коэффициент размножения
‘Берилл’	Fe(III)-EDTA	6,5 ± 0,3	2,4 ± 0,2	2,9 ± 0,2
	Fe(III)-EDDHA	9,1 ± 0,5	2,2 ± 0,2	3,2 ± 0,2
‘Грушенька’	Fe(III)-EDTA	6,6 ± 0,2	4,1 ± 0,2	4,5 ± 0,2
	Fe(III)-EDDHA	7,1 ± 0,2	3,2 ± 0,2	3,6 ± 0,2
‘Ксения’	Fe(III)-EDTA	7,0 ± 0,3	2,6 ± 0,2	3,1 ± 0,3
	Fe(III)-EDDHA	7,3 ± 0,3	2,7 ± 0,2	3,3 ± 0,2
‘Черносливовый’	Fe(III)-EDTA	7,0 ± 0,1	5,5 ± 0,2	6,1 ± 0,3
	Fe(III)-EDDHA	7,4 ± 0,2	5,2 ± 0,2	6,2 ± 0,3

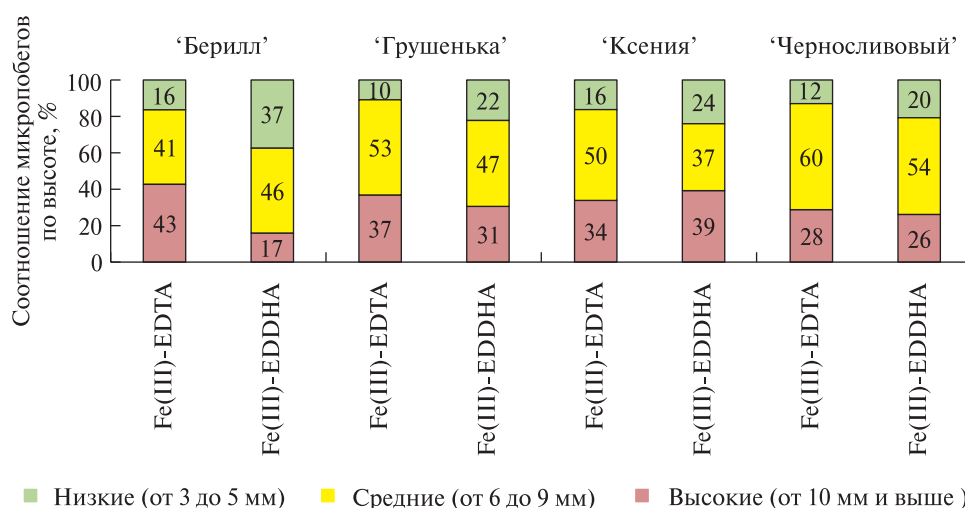


Рис. 1. Влияние формы хелата железа в среде QL на высоту микропобегов сортов крыжовника на этапе собственно микроразмножения

Fig. 1. The effect of chelated form of iron in QL medium on the height of microshoots of gooseberry cultivars at the multiplication stage

конгломератов мелких микропобегов, которые сложно использовать для дальнейшего укоренения. Для повышения высоты микропобегов крыжовника некоторые исследования показали эффективность использования дополнительного этапа элонгации — культивирование на питательной среде с пониженным содержанием макроэлементов (на 20 %), 6-БАП (0,1...0,3 мг/л) и в сочетании с гибберелловой кислотой (0,05...1,0 мг/л), 0,1 мг/л ИМК или витаминно-минеральным комплексом «Компливит» (2,0 г/л) [16, 30, 31].

В процессе исследования установлено влияние разных форм железа в питательной среде QL на морфометрические параметры микропобегов крыжовника. При использовании среды с Fe(III)-EDDHA отмечено увеличение высоты микропобегов сортов ‘Берилл’ и ‘Грушенька’ в 1,1–1,4 раза. Существенных различий в высоте микропобегов у сортов ‘Ксения’ и ‘Черносливовый’ на исследуемых средах не выявлены. При

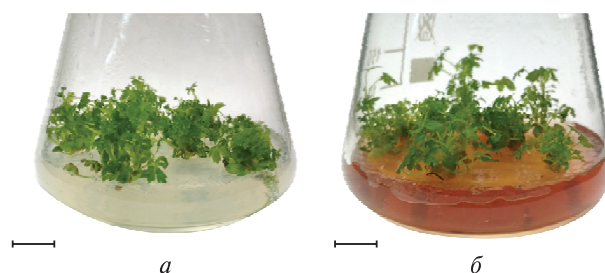


Рис. 2. Развитие микропобегов сорта ‘Черносливовый’ на питательной среде QL с 0,5 мг/л 6-БАП и разными формами железа: а — Fe(III)-EDTA; б — Fe(III)-EDDHA (масштаб 1:1,0 см)

Fig. 2. Development of ‘Chernoslivovyy’ microshoots on QL media with 0,5 mg/L 6-BAP and different iron chelates: а — Fe(III)-EDTA; б — Fe(III)-EDDHA (Bar = 1:1,0 cm)

этом у сортов ‘Берилл’, ‘Ксения’ и ‘Черносливовый’ по числу микропобегов и коэффициенту размножения на средах с разной формой железа различий не обнаружено (табл. 1).

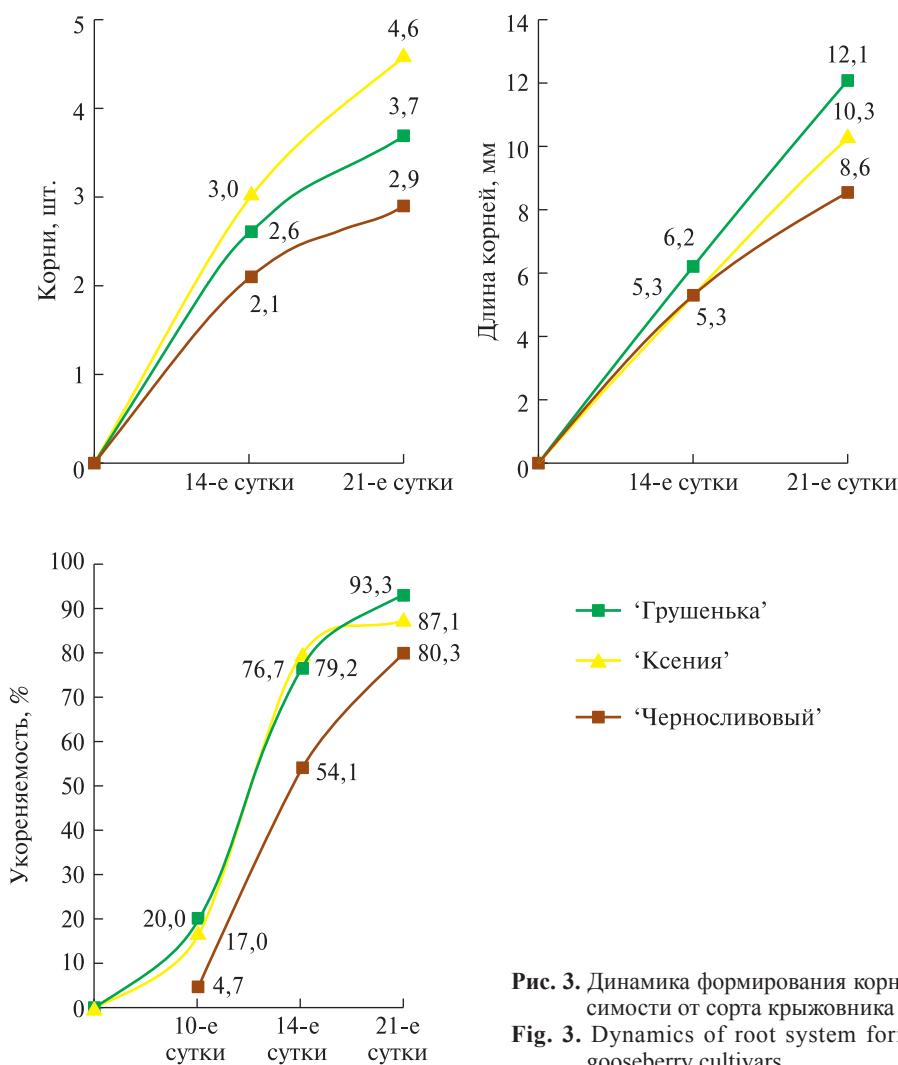


Рис. 3. Динамика формирования корневой системы в зависимости от сорта крыжовника
 Fig. 3. Dynamics of root system formation depending on gooseberry cultivars

В процессе исследования отмечали влияние сортовых особенностей на регенерацию микропобегов крыжовника. Наибольшим морфогенетическим потенциалом характеризуется сорт 'Черносливовый' (коэффициент размножения $6,1 \pm 0,3$ и $6,2 \pm 0,3$ соответственно формам железа Fe(III)-EDTA и Fe(III)-EDDHA). У сорта 'Берилл' при использовании среды с хелатом Fe(III)-EDDHA наблюдали наибольшее увеличение высоты микропобегов (в 1,4 раза), тогда как у сорта 'Грушенька' на данной среде увеличилась высота микропобегов в 1,1 раза, однако уменьшились их число (с $4,1 \pm 0,2$ до $3,2 \pm 0,2$ шт.) и коэффициент размножения (с $4,5 \pm 0,2$ до $3,6 \pm 0,2$). Существенных различий в высоте микропобегов на исследуемых средах у сортов 'Ксения' и 'Черносливовый' не установлено.

У сортов 'Берилл', 'Грушенька' и 'Черносливовый' при культивировании на питательных средах с добавлением Fe(III)-EDDHA выявлено уменьшение (соответственно 17, 31 и 26 %) процента низких микропобегов по сравнению со средой, содержащей хелат Fe(III)-EDTA (со-

ответственно 43, 37 и 28 %). У сорта 'Ксения' больший процент низких микропобегов наблюдали на среде с хелатом Fe(III)-EDDHA (39 %). При этом процент микропобегов, пригодных для дальнейшего укоренения (высотой 10 мм и выше), на среде с хелатом Fe(III)-EDDHA увеличивался у всех исследуемых сортов до 20...37 % (рис. 1, 2).

Установлено, что форма источника железа (Fe^{2+}), валентность иона железа, типы лигандов и их концентрации в составе питательной среды QL являются важными факторами при размножении и укоренении *R. uva-crispa* сорта 'Розовый-2' [32, 33]. Однако в данных работах указана меньшая эффективность хелата Fe(III)-EDDHA при его введении в состав питательной среды по сравнению с хелатом Fe(III)-EDTA, в отличие от полученных нами результатов.

Этап укоренения является важной стадией клонального микроразмножения, когда основной задачей является формирование развитой корневой системы у регенерантов для последующей адаптации в условиях *ex vitro*. Для укоренения сортов крыжовника используют в основном

Т а б л и ц а 2

Морфометрические параметры корневой системы и укореняемость сортов крыжовника при применении разных типа и концентрации ауксинов

Morphometric parameters of the root system and rootability of gooseberry cultivars when using different types and concentrations of auxins

Сорт	Тип ауксина	Концентрация, мг/л	Число корней, шт.	Длина корней, мм	Укореняемость, %	
'Грушенька'	Б/Г (контрольный вариант)	0,0	1,5 ± 0,1	13,5 ± 1,9	73,3	
		ИМК	0,5	4,3 ± 0,3	12,3 ± 0,7	98,3
			1,0	4,5 ± 0,4	9,3 ± 0,6	94,6
	ИУК	1,5	3,7 ± 0,3	8,0 ± 0,5	96,7	
		0,5	3,6 ± 0,3	16,7 ± 0,9	95,0	
		1,0	4,0 ± 0,3	13,9 ± 0,9	96,7	
'Ксения'	Б/Г (контрольный вариант)	0,0	2,0 ± 0,3	10,5 ± 1,1	35,1	
		ИМК	0,5	5,8 ± 0,5	9,1 ± 0,6	100,0
			1,0	6,0 ± 0,5	8,5 ± 0,5	96,7
	ИУК	1,5	4,5 ± 0,4	7,3 ± 0,5	91,1	
		0,5	3,9 ± 0,3	13,7 ± 0,8	100,0	
		1,0	4,9 ± 0,4	11,2 ± 0,8	95,6	
'Черносливовый'	Б/Г (контрольный вариант)	0,0	2,0 ± 0,2	10,4 ± 1,2	46,7	
		ИМК	0,5	4,0 ± 0,3	8,4 ± 0,5	93,3
			1,0	3,4 ± 0,2	6,6 ± 0,4	96,7
	ИУК	1,5	3,5 ± 0,2	5,7 ± 0,4	97,8	
		0,5	2,6 ± 0,3	10,6 ± 0,9	81,2	
		1,0	2,3 ± 0,3	8,4 ± 1,1	73,3	
		1,5	2,5 ± 0,3	10,0 ± 1,2	73,3	

питательную среду с добавлением ИМК [16, 17]. Кроме того, было показано, что некоторые сорта крыжовника укореняются до 50 % при культивировании на безгормональной среде QL [34].

Начало корнеобразования у эксплантов крыжовника наблюдали уже после 10 сут. культивирования. Установлено влияние сортовых особенностей на развитие корневой системы крыжовника (рис. 3).

Наибольшей частотой ризогенеза на 10-е сутки характеризуются сорта 'Грушенька' (20,0 %) и 'Ксения' (17,0 %). У сорта 'Черносливовый' — 4,7 % укорененных эксплантов. Через 14 и 21 сут. у данных сортов сохранялась подобная тенденция: 'Грушенька' (76,7 и 93,3 % соответственно) > 'Ксения' (79,2 и 87,1 %) > 'Черносливовый' (54,1 % и 80,3 %). Определены различия в морфометрических параметрах корневой системы. Сорт 'Ксения' отличается наибольшим числом корней (3,0 на 14-е и 4,6 шт. на 21-е сутки), сорт 'Грушенька' — наибольшей их длиной (соответственно 6,2 и 12,1 мм). Наименее развита корневая система у сорта 'Черносливовый': число корней 2,1 и 2,9 шт. и длина корней 5,3 и 8,6 мм соответственно.

На развитие корневой системы исследуемых сортов крыжовника оказывают влияние тип и концентрация ауксина в составе питательной среды (табл. 2, рис. 4).

Исследуемые сорта крыжовника отличаются и укоренением. Наибольший процент укорененных микропобегов зафиксирован у сорта 'Черносливовый' на средах с добавлением ИМК (93,3...97,8 %) по сравнению со средами с ИУК (73,3...81,2 %). У других сортов различий в частоте ризогенеза на средах с ИМК и ИУК не выявлено.

Добавление в состав питательной среды ауксинов ИМК и ИУК способствовало достоверному увеличению числа корней по сравнению с контрольной средой без них. При культивировании микропобегов на питательной среде с ИМК наблюдали образование большого числа корней. Добавление в питательную среду ИУК приводило к формированию более длинных корней.

У микропобегов крыжовника на питательных средах с большей концентрацией ауксинов (1,0 и 1,5 мг/л) уменьшалось количество корней и их длина, снижался процент укорененных микропобегов, за исключением сорта 'Грушенька', у которого при культивировании на данных средах

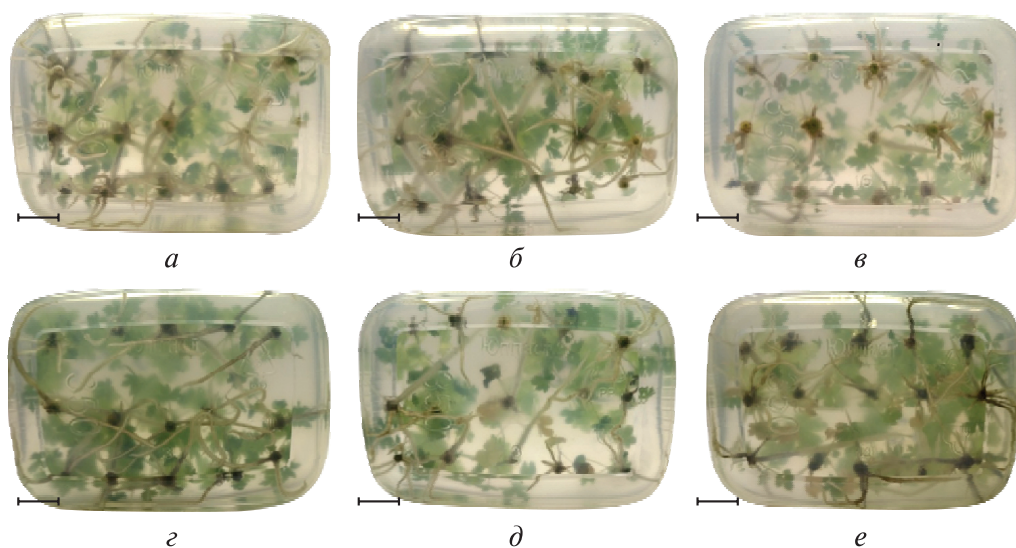


Рис. 4. Развитие корневой системы сорта 'Ксения' на средах с добавлением индолил-3-масляной кислоты в концентрации 0,5...1,5 мг/л (а-в) и индолил-3-уксусной кислоты в концентрации 0,5...1,5 мг/л (z-e) (масштаб 1:1,0 см)

Fig. 4. Development of the root system of the cultivar 'Kseniya' on media with 0,5...1,5 mg/L IBA (a-e) and 0,5...1,5 mg/L IAA (z-e) (Bar = 1:1,0 cm)

не выявлены существенные различия по числу корней ($3,6 \pm 0,3 \dots 4,5 \pm 0,4$ шт.), и сорта 'Ксения' — на средах с повышением концентрации ИУК число корней увеличивалось (от $3,9 \pm 0,3$ до $5,4 \pm 0,4$ шт.).

У всех исследуемых сортов отмечено спонтанное укоренение на безгормональной среде. Наибольшей частотой ризогенеза на данной среде характеризуется сорт 'Грушенька' (73,3 %). У сортов 'Ксения' и 'Черносливовый' — меньшие значения (35,1 и 46,7 %), однако на данной среде корни тонкие и их число на микропобегах не выше 2,0 шт.

Выводы

На этапе собственно микроразмножения для элонгации микропобегов крыжовника наиболее эффективно использование хелата Fe(III)-EDDHA в составе питательной среды QL по сравнению с Fe(III)-EDTA. При культивировании на средах с хелатом Fe(III)-EDDHA наблюдается увеличение высоты микропобегов в 1,1–1,4 раза. Процент микропобегов, пригодных для дальнейшего укоренения (высотой 10 мм и выше), на средах с Fe(III)-EDDHA составил от 20 до 37 % в зависимости от сорта.

На этапе укоренения наиболее эффективно использование преимущественно питательной среды 1/2 MS с добавлением 0,5 мг/л ИМК. На частоту ризогенеза и формирование корневой системы оказывают влияние сортовые особенности крыжовника, тип и концентрация ауксинов.


Работа выполнена в рамках государственного задания ГБС РАН (№ 122042700002-6).

Список литературы

- [1] Wang H., Cao G., Prior R.L. Total antioxidant capacity of fruits // J. of agricultural and food chemistry, 1996, v. 44(3), pp. 701–705. DOI: 10.1021/jf950579y
- [2] Голуб О.В., Ковалевская И.Н., Габерман Т.С. Товароведная характеристика ягод крыжовника // Техника и технология пищевых производств, 2010. Т. 17. № 2. С. 73–77. URL: https://fptt.ru/upload/journals/fppt/2010_17_2/№%2017.pdf (дата обращения 27.02.2023).
- [3] Толстогузова В.Г. Земляника садовая и крыжовник в Нечерноземье. М.: Изд-во ВСТИСП, 2017. 180 с.
- [4] Viljakainen S., Visti A., Laakso S. Concentrations of organic acids and soluble sugars in juices from Nordic berries // Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Plant Soil Science, 2002, v. 52(2), pp. 101–109. DOI: 10.1080/090647102321089846
- [5] Häkkinen S.H., Kärenlampi S.O., Heinone, I.M., Mykkänen H.M., Törrönen A.R. Content of the flavonols quercetin, myricetin, and kaempferol in 25 edible berries // J. of Agricultural and Food Chemistry, 1999, v. 47(6), pp. 2274–2279. DOI: 10.1021/jf9811065
- [6] Määttä-Riihinen K.R., Kamal-Eldin A., Mattila P.H., González-Paramás A.M., Törrönen A.R. Distribution and contents of phenolic compounds in eighteen Scandinavian berry species // J. of Agricultural and Food Chemistry, 2004, v. 52(14), pp. 4477–4486. DOI: 10.1021/jf049595y
- [7] Ковешникова Е.Ю. Перспективы промышленного производства плодов крыжовника // Садоводство и виноградарство, 2001, № 3. С. 24–27.
- [8] Типсина Н.Н., Демиденко Г.А., Гречишниковна Н.А. Использование крыжовника в мучных кондитерских изделиях // Вестник Красноярского государственного аграрного университета, 2015, № 4. С. 41–44. URL: <http://www.kgau.ru/vestnik/content/2015/4.pdf> (дата обращения 27.02.2023).
- [9] Gónas P., Soliven A., Segliņa D. Seed oils recovered from industrial fruit by products are a rich source of tocopherols and tocotrienols: Rapid separation of $\alpha/\beta/\gamma/\delta$ homologues

- by RP HPLC/FLD // European J. of Lipid Science and Technology, 2015, v. 117(6), pp. 773–777.
DOI: 10.1002/EJLT.201400566
- [10] Ördögh, L., Galgóczy L., Krisch J., Papp T., Vágvölgyi C. Antioxidant and antimicrobial activities of fruit juices and pomace extracts against acne-inducing bacteria // Acta Biologica Szegediensis, 2010, v. 54(1), pp. 45–49. URL: <https://abs.bibl.u-szeged.hu/index.php/abs/article/view/2685> (дата обращения 27.02.2023).
- [11] Krisch J., Ördögh L., Galgóczy L., Papp T., Vágvölgyi C. Anticandidal effect of berry juices and extracts from *Ribes* species // Open Life Sciences, 2009, v. 4(1), pp. 86–89. DOI: 10.2478/s11535-008-0056-z
- [12] Титова Ю.Г., Курашев О.В. Основополагающие модели размножения посадочного материала крыжовника (обзор литературы) // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии, 2021. № 5. С. 60–68.
- [13] Dzedzic E., Jagła J. Micropropagation of *Rubus* and *Ribes* spp // Protocols for Micropropagation of Selected Economically-Important Horticultural Plants. Totowa, NJ: Humana Press, 2012, pp. 149–160. DOI: 10.1007/978-1-62703-074-8_11
- [14] Оверченко О.В., Клюваденко А.А., Ліханов А.Ф., Костенко С.М., Мельничук М.Д. Розмноження перспективних сортів агрусу (*Grossularia reclinata* L.) в культурі *in vitro* // Науковий вісник НЛТУ України, 2014. Вып. 24(8). С. 87–93.
- [15] Kucharska D., Orlikowska T., Maciorowski R., Kunka M., Wójcik D., Pluta S. Application of meta-Topolin for improving micropropagation of gooseberry (*Ribes grossularia*) // Scientia Horticulturae, 2020, v. 272, p. 109529. DOI: 10.1016/j.scienta.2020.109529
- [16] Размножение плодовых растений в культуре *in vitro* / под ред. Н.В. Кухарчик. Минск: Беларуская навука, 2016. 236 с.
- [17] Кузнецова И.Б., Макаров С.С. Влияние росторегулирующих веществ на процесс корнеобразования крыжовника на этапе «укоренение *in vitro*» // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова, 2020. № 1(58). С. 114–117. DOI: 10.34655/bgsha.2020.58.1.017
- [18] Dalton C.C., Iqbal K., Turner D. A. Iron phosphate precipitation in Murashige and Skoog media // Physiologia Plantarum, 1983, v. 57, pp. 472–476. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1983.tb02771.x
- [19] Hangarter R.P., Stasinopoulos T.C. Effect of Fe-catalyzed photooxidation of EDTA on root growth in plant culture media // Plant physiology, 1991, v. 96(3), pp. 843–847. DOI: 10.1104/pp.96.3.843
- [20] Gómez Gallego M., Pellico D., Ramírez López P., Mancheño M. J., Romano S., Torre M.C., Sierra M.A. Understanding of the mode of action of FeIII–EDDHA as iron chlorosis corrector based on its photochemical and redox behavior // Chemistry: A European J., 2005, v. 11(20), pp. 5997–6005. DOI: 10.1002/chem.200500286
- [21] Zawadzka M., Orlikowska T. The influence of FeEDDHA in red raspberry cultures during shoot multiplication and adventitious regeneration from leaf explants // Plant cell, tissue and organ culture, 2006, v. 85(2), pp. 145–149. DOI: 10.1007/s11240-005-9063-1
- [22] Garrison W., Dale A., Saxena P.K. Improved shoot multiplication and development in hybrid hazelnut nodal cultures by ethylenediamine di-2-hydroxy-phenylacetic acid (Fe-EDDHA) // Canadian J. of Plant Science, 2013, v. 93(3), pp. 511–521. DOI: 10.4141/cjps2012-218
- [23] Королева О.В., Егорова Д.А., Молканова О.И. Влияние источника железа в составе питательной среды на морфогенетический потенциал и укореняемость представителей рода *Syringa* L. // Плодоводство и ягодоводство России, 2020. Т. 59. С. 33–38. DOI: 10.31676/2073-4948-2019-59-33-38
- [24] Al-Mayahi A.M.W. In vitro plant regeneration system for date palm (*Phoenix dactylifera* L.): effect of chelated iron sources // J. of Genetic Engineering and Biotechnology, 2021, v. 19(1), pp. 1–9. DOI: 10.1186/s43141-021-00177-4
- [25] Бутенко Р.Г. Биология культивируемых клеток и биотехнология растений. М.: Наука, 1991. 279 с.
- [26] Молканова О.И., Королева О.В., Стахеева Т.С., Крахмалева И.Л., Мелешук Е.А. Совершенствование технологии клонального микроразмножения ценных плодовых и ягодных культур для производственных условий // Достижения науки и техники АПК, 2018, Т. 32. № 9. С. 66–69. DOI: 10.24411/0235-2451-2018-10915
- [27] Quoirin M., Lepoivre P. Improved medium for *in vitro* culture of *Prunus* sp. // Acta Horticulturae, 1977, v. 78, pp. 437–442. DOI: 10.17660/ActaHortic.1977.78.54
- [28] Murashige T., Skoog F. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures // Physiologia Plantarum, 1962, v. 15(3), pp. 473–497. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x
- [29] Основы создания генобанка *in vitro* видов, сортов и отборных форм декоративных, ароматических и плодовых культур / под ред. И.В. Митрофановой. Симферополь: Ариал, 2018. 260 с.
- [30] Матушкина О.В., Пронина И.Н. Клональное микроразмножение плодовых и ягодных культур в системе производства высококачественного посадочного материала // Научные основы эффективного садоводства: Труды Всероссийского научно-исследовательского института садоводства имени И.В. Мичурина: 75 лет со дня основания: город Мичуринск — наукоград Российской Федерации. Воронеж: Кварта, 2006, С. 327–342.
- [31] Сковородников Д.Н. Совершенствование клонального микроразмножения крыжовника // Вестник ОрелГАУ, 2012. № 6(39). С. 24–26.
- [32] Nikulina E., Akimova S., Tsiurlnikova N., Kirkach V. Different Fe (III) and Fe (II) complexes in clonal micropropagation of Gooseberry // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, v. 578. p. 012015. DOI: 10.1088/1755-1315/578/1/012015
- [33] Nikulina E. A., Akimova S.V., Tsiurlnikova N.V., Glinushkin A.P., Dolgoborodov I.O., Kirkach V.V. Screening of different Fe (II) and Fe (III) complexes at the stage of rhizogenesis *in vitro* of gooseberry plants // J. of Physics: Conference Series, 2021, v. 1942, pp. 012075. DOI: 10.1088/1742-6596/1942/1/012075
- [34] Welander M. Micropropagation of gooseberry, *Ribes grossularia* // Scientia Horticulturae, 1985, v. 26(3), pp. 267–272. DOI: 10.1016/0304-4238(85)90114-1

Сведения об авторах

Крахмалева Ирина Леонидовна  — мл. науч. сотр. лаборатории биотехнологии растений, ФГБУН «Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина Российской академии наук» (ГБС РАН), seglory@bk.ru

Королева Ольга Васильевна — науч. сотр. лаборатории биотехнологии растений, ФГБУН «Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина Российской академии наук» (ГБС РАН), elaem@yandex.ru

Молканова Ольга Ивановна — канд. с.-х. наук, вед. науч. сотр., заведующий лабораторией биотехнологии растений, ФГБУН «Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина Российской академии наук» (ГБС РАН), molkanova@mail.ru.

Поступила в редакцию 03.04.2023.

Одобрено после рецензирования 06.10.2023.

Принята к публикации 28.11.2023.

REGENERATION AND ROOTING FEATURES OF *RIBES UVA-CRISPA* L. CULTIVARS *IN VITRO*

I.L. Krakhmaleva , O.V. Koroleva, O.I. Molkanova

Tsitsin Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences, 4, Botanicheskaya st., 127276, Moscow, Russia

seglory@bk.ru

The article focuses on optimizing medium composition for promising gooseberry (*Ribes uva-crispa* L.) cultivars at the multiplication and rooting stages. The research was carried out in the Laboratory of Plant Biotechnology of Tsitsin Main Botanical Garden of Russian Academy of Sciences in 2022. Cultivars ‘Berill’, ‘Grushen’ka’, ‘Kseniya’ and ‘Chernoslivovy’ were used in the experiments. The effect of iron chelate forms (Fe(III)-EDDHA and Fe(III)-EDTA) on morphogenetic parameters and development of gooseberry microshoots was determined. At the micropropagation stage addition of 100 mg/L Fe(III)-EDDHA to Quorin and Lepoivre medium increased the height of microshoots of the studied cultivars. The number of microshoots available for further rooting (10 mm height and above) ranged from 20 to 37 % on the media containing 100,0 mg/L Fe(III)-EDDHA compared to the media with 36,7 mg/L Fe(III)-EDTA (10...16 %). The highest morphogenetic potential was found in ‘Chernoslivovy’, which had 1,4...2,1 times higher multiplication rate than other cultivars. Rooting ability and morphometric parameters of root system were found influenced by genetic characteristics of gooseberry cultivars, type and concentration of auxins in half-strength Murashige and Skoog medium. Using of the media with 0,5...1,5 mg/L of Indolyl-3-butyric acid encouraged the formation of higher number of roots, whereas the media with 0,5...1,5 mg/L of Indolyl-3-acetic acid increased their length. Usage of medium with 0,5 mg/L Indole-3-butyric acid was found to be the most effective for rooting of most studied cultivars.

Keywords: *Ribes uva-crispa* L., clonal micropropagation, multiplication rate, rhizogenesis

Suggested citation: Krakhmaleva I.L., Koroleva O.V., Molkanova O.I. *Osobennosti regeneratsii i ukoreneniya sortov kryzhovnika obyknovennogo Ribes uva-crispa* L. v kul'ture in vitro [Regeneration and rooting features of *Ribes uva-crispa* L. cultivars in vitro]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2024, vol. 28, no. 5, pp. 94–103.

DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-94-103

References

- [1] Wang H., Cao G., Prior R.L. Total antioxidant capacity of fruits // J. of agricultural and food chemistry, 1996, v. 44(3), pp. 701–705. DOI: 10.1021/jf950579y
- [2] Golub O.V., Kovalevskaya I.N., Gaberman T.S. *Tovarovednaya kharakteristika yagod kryzhovnika* [The commodity characteristic of gooseberries]. Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv [Food Processing: Techniques and Technology], 2010, no. 2(17), pp. 73–77. Available at: https://fptt.ru/upload/journals/fptt/2010_17_2/№%2017.pdf (accessed 27.02.2023).
- [3] Tolstoguzova V.G. *Zemlyanika sadovaya i kryzhovnik v Nechernozeme* [Strawberries and gooseberries in the Non-Black-Earth Region]. Moscow: ARHC BAN, 2017, 180 p.
- [4] Viljakainen S., Visti A., Laakso S. Concentrations of organic acids and soluble sugars in juices from Nordic berries. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Plant Soil Science, 2002, v. 52(2), pp. 101–109. DOI: 10.1080/090647102321089846
- [5] Häkkinen S.H., Kärenlampi S.O., Heinone, I.M., Mykkänen H.M., Törrönen A.R. Content of the flavonols quercetin, myricetin, and kaempferol in 25 edible berries. J. of Agricultural and Food Chemistry, 1999, v. 47(6), pp. 2274–2279. DOI: 10.1021/jf9811065
- [6] Määttä-Riihinen K.R., Kamal-Eldin A., Mattila P.H., González-Paramás A.M., Törrönen A.R. Distribution and contents of phenolic compounds in eighteen Scandinavian berry species. J. of Agricultural and Food Chemistry, 2004, v. 52(14), pp. 4477–4486. DOI: 10.1021/jf049595y
- [7] Koveshnikova E.Yu. *Perspektivy promyshlennogo proizvodstva plodov kryzhovnika* [Prospects for industrial production of gooseberry fruits]. Sadovodstvo i vinogradarstvo [Horticulture and viticulture], 2001, no. 3, pp. 24–27.

- [8] Tipsina N.N., Demidenko G.A., Grechishnikova N.A. *Ispolzovanie kryzhovnika v muchnykh konditerskikh izdeliyakh* [The use of gooseberries in flour confectionery]. Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University], 2015, no. 4, pp. 41–44. Available at: <http://www.kgau.ru/vestnik/content/2015/4.pdf> (accessed 27.02.2023).
- [9] Górnaś P., Soliven A., Segliņa D. Seed oils recovered from industrial fruit by products are a rich source of tocopherols and tocotrienols: Rapid separation of $\alpha/\beta/\gamma/\delta$ homologues by RP HPLC/FLD. *European J. of Lipid Science and Technology*, 2015, v. 117(6), pp. 773–777. DOI: 10.1002/EJLT.201400566
- [10] Ördög, L., Galgóczy L., Krisch J., Papp T., Vágvölgyi C. Antioxidant and antimicrobial activities of fruit juices and pomace extracts against acne-inducing bacteria. *Acta Biologica Szegediensis*, 2010, v. 54(1), pp. 45–49. URL: <https://abs.bibl.u-szeged.hu/index.php/abs/article/view/2685> (дата обращения 27.02.2023).
- [11] Krisch J., Ördög L., Galgóczy L., Papp T., Vágvölgyi C. Anticandidal effect of berry juices and extracts from *Ribes* species. *Open Life Sciences*, 2009, v. 4(1), pp. 86–89. DOI: 10.2478/s11535-008-0056-z
- [12] Titova Yu.G., Kurashev O.V. *Osnovopolagayushchie modeli razmnzheniya posadochnogo materiala kryzhovnika (obzor literatury)* [Basic methods of gooseberry plant material propagation (literature review)]. Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii [Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy], 2021, no. 5, pp. 60–68.
- [13] Dziejic E., Jagła J. Micropropagation of *Rubus* and *Ribes* spp. Protocols for Micropropagation of Selected Economically-Important Horticultural Plants. Totowa, NJ: Humana Press, 2012, pp. 149–160. DOI: 10.1007/978-1-62703-074-8_11
- [14] Overchenko O.V., Kliuvadenko A.A., Likhanov A.F., Kostenko S.M., Melnychuk M.D. *Rozmnzheniya perspektivnykh sortiv arrusu (Grossularia reclinata L.) v kulturi in vitro* [The reproduction of gooseberries varieties (*Grossularia reclinata* L.) in vitro culture]. Naukoviy visnik NLTU Ukraïni [Scientific Bulletin of UNFU], 2014, v. 24(8), pp. 87–93.
- [15] Kucharska D., Orlikowska T., Maciorowski R., Kunka M., Wójcik D., Pluta S. Application of meta-Topolin for improving micropropagation of gooseberry (*Ribes grossularia*). *Scientia Horticulturae*, 2020, v. 272, p. 109529. DOI: 10.1016/j.scienta.2020.109529
- [16] *Razmnzhenie plodovykh rasteniy v kulture in vitro* [Reproduction of fruit plants in culture in vitro]. Ed. N.V. Kukharchik. Minsk: Belorusskaya nauka, 2016, 236 p.
- [17] Kuznetsova I., Makarov S. *Vliyanie rostoreguliruyushchikh veshchestv na protsess korneobrazovaniya kryzhovnika na etape «ukorenenie in vitro»* [Influence of growth-regulating substances on the process of root formation of gooseberries at the «rooting in vitro» stage]. Vestnik Buryatskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii im. V.R. Filippova [Bulletin of the Buryat State Agricultural Academy named after V. R. Filippov], 2020, no. 1(58), pp. 114–117. DOI: 10.34655/bgsha.2020.58.1.017
- [18] Dalton C.C., Iqbal K., Turner D. A. Iron phosphate precipitation in Murashige and Skoog media. *Physiologia Plantarum*, 1983, v. 57, pp. 472–476. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1983.tb02771.x
- [19] Hangarter R.P., Stasinopoulos T.C. Effect of Fe-catalyzed photooxidation of EDTA on root growth in plant culture media. *Plant physiology*, 1991, v. 96(3), pp. 843–847. DOI: 10.1104/pp.96.3.843
- [20] Gómez Gallego M., Pellico D., Ramírez López P., Mancheño M. J., Romano S., Torre M.C., Sierra M.A. Understanding of the mode of action of FeIII–EDDHA as iron chlorosis corrector based on its photochemical and redox behavior. *Chemistry: A European J.*, 2005, v. 11(20), pp. 5997–6005. DOI: 10.1002/chem.200500286
- [21] Zawadzka M., Orlikowska T. The influence of FeEDDHA in red raspberry cultures during shoot multiplication and adventitious regeneration from leaf explants. *Plant cell, tissue and organ culture*, 2006, v. 85(2), pp. 145–149. DOI: 10.1007/s11240-005-9063-1
- [22] Garrison W., Dale A., Saxena P.K. Improved shoot multiplication and development in hybrid hazelnut nodal cultures by ethylenediamine di-2-hydroxy-phenylacetic acid (Fe-EDDHA). *Canadian J. of Plant Science*, 2013, v. 93(3), pp. 511–521. DOI: 10.4141/cjps2012-218
- [23] Koroleva O.V., Egorova D.A., Molkanova O.I. *Vliyanie istochnika zheleza v sostave pitatelnoy sredy na morfogeneticheskiy potentsial i ukorenyaemost predstaviteley roda Syringa L.* [The influence of ferrum source in culture medium composition on morphogenetic potential and rooting ability of genus *Syringa* L. representatives]. *Plodovodstvo i yagodovodstvo Rossii* [Pomiculture and small fruits culture in Russia], 2019, v. 59, pp. 33–38. DOI: 10.31676/2073-4948-2019-59-33-38
- [24] Al-Mayahi A.M.W. In vitro plant regeneration system for date palm (*Phoenix dactylifera* L.): effect of chelated iron sources. *J. of Genetic Engineering and Biotechnology*, 2021, v. 19(1), pp. 1–9. DOI: 10.1186/s43141-021-00177-4
- [25] Butenko R.G. *Biologiya kultiviruemykh kletok i biotekhnologiya rasteniy* [Biology of cultivated cells and plant biotechnology]. Moscow: Science, 1991, 279 p.
- [26] Molkanova O.I., Koroleva O.V., Stacheeva T.S., Krakhmaleva I.L., Meleshchuk E.A. *Sovershenstvovanie tekhnologii klonalnogo mikrorazmnzheniya tsennykh plodovykh i yagodnykh kultur dlya proizvodstvennykh usloviy* [Improvement of clonal micropropagation technology of valuable fruit and berry crops varieties for commercial conditions]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* [Achievements of Science and Technology of AIC], 2018, v. 32(9), pp. 66–69. DOI: 10.24411/0235-2451-2018-10915
- [27] Quoirin M., Lepoivre P. Improved medium for *in vitro* culture of *Prunus* sp. *Acta Horticulturae*, 1977, v. 78, pp. 437–442. DOI: 10.17660/ActaHortic.1977.78.54
- [28] Murashige T., Skoog F.A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*, 1962, v. 15(3), pp. 473–497. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x
- [29] *Osnovy sozdaniya genobanka in vitro vidov, sortov i otbornykh form dekorativnykh, aromatischeskikh i plodovykh kultur* [Fundamentals of in vitro genobank of species, cultivars and forms in ornamental, aromatic and fruit crops]. Ed. I.V. Mitrofanov. Simferopol: PH «ARIAL», 2018, 260 p.
- [30] Matushkina O.V., Pronina I.N. *Klonalnoe mikrorazmnzhenie plodovykh i yagodnykh kultur v sisteme proizvodstva vysokokachestvennogo materiala* [Clonal micropropagation of fruit and berry crops in the production system of high-quality material]. *Nauchnye osnovy effektivnogo sadovodstva: trudy Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta sadovodstva im. I.V.Michurina: 75 let so dnya osnovaniya: Michurinsk — Naukograd Rossiyskoy Federatsii* [Scientific foundations of effective gardening: proceedings of the All-Russian Scientific Research Institute of Horticulture named after I.V. Michurin: 75 years since its foundation: Michurinsk — Science City of the Russian Federation], Voronezh: Kvarta, 2006, pp. 327–342.

- [31] Skovorodnikov D.N. *Sovershenstvovanie klonalnogo mikrorazmnozheniya kryzhovnika* [Improvement of clonal micropropagation of gooseberries]. Vestnik OrelGAU [Bulletin of OrelSAU], 2012, no. 6(39), pp. 24–26.
- [32] Nikulina E., Akimova S., Tsiurlikova N., Kirkach V. Different Fe (III) and Fe (II) complexes in clonal micropropagation of Gooseberry. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, v. 578. p. 012015. DOI: 10.1088/1755-1315/578/1/012015
- [33] Nikulina E.A., Akimova S.V., Tsiurlikova N.V., Glinushkin A.P., Dolgoborodov I.O., Kirkach V.V. Screening of different Fe (II) and Fe (III) complexes at the stage of rhizogenesis in vitro of gooseberry plants. J. of Physics: Conference Series, 2021, v. 1942, pp. 012075. DOI: 10.1088/1742-6596/1942/1/012075
- [34] Welander M. Micropropagation of gooseberry, *Ribes grossularia*. Scientia Horticulturae, 1985, v. 26(3), pp. 267–272. DOI: 10.1016/0304-4238(85)90114-1

The work was carried out under the state assignment of MBG RAS (No. 122042700002-6).

Authors' information

Krakhmaleva Irina Leonidovna✉ — Junior researcher of Plant Biotechnology Laboratory, Tsitsin Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences, seglory@bk.ru

Koroleva Ol'ga Vasil'evna — Researcher of Plant Biotechnology Laboratory, Tsitsin Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences, elaem@yandex.ru

Molkanova Ol'ga Ivanovna — Cand. Sc. (Agr.), Leading researcher, Head of Plant Biotechnology Laboratory, Tsitsin Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences, molkanova@mail.ru

Received 03.04.2023.

Approved after review 06.10.2023.

Accepted for publication 28.11.2023.

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

ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ КОМПЛЕКСА ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРАКТИК В ВОПРОСАХ ПОДДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДНОГО БАЛАНСА

С.С. Морковина, Н.Н. Харченко✉, С.С. Шешнищан,
Е.А. Панявина, А.В. Иванова, А.И. Водолажский

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова» (ВГЛТУ), Россия, 394087, Воронеж, ул. Тимирязева, д. 8

forest.vrn@gmail.com

Рассмотрены вопросы результативности лесохозяйственных мероприятий, направленных на снижение горимости лесов в региональных системах лесного хозяйства. Установлено, что в 2021 г. на территориях большинства Федеральных округов Российской Федерации наблюдается преимущественное снижение темпов накопления углерода в лесном фонде на 8...39 % по отношению к 2010 г. На основании анализа документов лесного планирования выполнена градация субъектов Федерации по уровню изменения бюджета углерода. В рассматриваемый период имели место негативные тенденции по снижению бюджета углерода в лесах в 62 субъектах Российской Федерации. Наибольшее количество критических регионов находится в Дальневосточном федеральном округе, что объясняется его удаленностью, слабой развитостью транспорта и логистики, а также значительными запасами лесных ресурсов по сравнению с другими федеральными округами. Установлено, что в критических регионах за анализируемый период, потери углерода в лесном фонде составили в Магаданской области 335 %, в Ненецком автономном округе до 235 % и в Хабаровском крае более 180 % бюджета углерода. Определен перечень наиболее значимых мероприятий, направленных на сокращение выбросов и потерь углерода в региональных системах лесного хозяйства. В разряд ключевых, отнесены мероприятия по снижению горимости лесов. Комплексная реализация подобных мер обусловит сокращение выбросов парниковых газов с 264,4 до 142,4 млн т CO₂-экв./год до 2030 г. Определен необходимый объем финансирования дополнительных противопожарных мероприятий на период 2024–2030 гг. составивший 28 964,8 млн руб.

Ключевые слова: лесное хозяйство, экономика, лесоуправление, углеродный баланс, климат, лесные пожары

Ссылка для цитирования: Морковина С.С., Харченко Н.Н., Шешнищан С.С., Панявина Е.А., Иванова А.В., Водолажский А.И. Эколого-экономическая оценка результативности комплекса лесохозяйственных практик в вопросах поддержания углеродного баланса // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 5. С. 104–117. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-104-117

Леса России, выполняя многочисленные хозяйственные, социальные и экосистемные функции, выступают ценнейшим ресурсом. Функцию управления лесами берет на себя государство и осуществляет ее путем планирования и контроля использования лесных ресурсов, администрирования платежей за лесопользование и обеспечения охраны и защиты лесов [1]. Финансирование комплекса лесохозяйственных мероприятий и выполнения функций лесоуправления ежегодно растет, что неразрывно связано с увеличением количества и качества производимых работ [2].

Среди глобальных вызовов ученые называют изменения климата и адаптацию окружающей среды к последствиям этих изменений [3], поэтому вопросы климаторегулирующего значения лесов, в связи с этим приобрели актуальность и являются востребованными [4–6].

Хозяйственная ценность лесов, определяемая стоимостью древесины, снижается, в то время как их экологическая ценность для биосферных процессов и выполняемые экосистемные функции повышаются [7–9]. Важности лесных экосистем большее значение придается в Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации, которой предусмотрено снижение уровня выбросов парниковых газов в атмосферу до 2050 г. и увеличение их поглощения до 1200 млн т CO₂-экв./год [10].

Учеными и специалистами-практиками в сфере лесоводства изучены различные аспекты создания специальных лесных насаждений, положительно влияющих на динамику локальных климатических условий, которые снижают остроту колебаний атмосферных и почвенно-гидрологических процессов [11–14]. Важнейшими инструментами, обеспечивающими рост поглощающей способности лесов и поддержание их климаторегулирующих функций, являются

государственная программа «Развитие лесного хозяйства» и федеральный проект «Сохранение лесов», входящие в национальный проект «Экология». На всех уровнях государственного управления принимаются меры, оказывающие положительное влияние на воспроизводство лесов, в том числе на динамику баланса выбытия и воспроизводства [15, 16]. В то же время для повышения адаптационной способности лесов и увеличения поглощения парниковых газов необходимо обеспечить рост эффективности лесохозяйственных мероприятий [17]. Возможны и необходимы дополнительные лесохозяйственные меры, которые, как показывает практика, неизбежно ведут к увеличению расходов на лесоводство, что вызывает рост финансирования лесного хозяйства в целом [18]. Исследователи отмечают необходимость эколого-экономического обоснования ведения лесного хозяйства как по причине возрастающего дисбаланса содержания диоксида углерода в биосфере, так и по приоритетам развития лесного хозяйства в целом [19–21].

В условиях постоянного недофинансирования региональных систем лесохозяйственных мероприятий, выделение дополнительных средств на снижение негативного влияния аномальных климатических факторов не должно замедляться. Привлечение новых источников инвестиций в этом направлении, может составить альтернативу сложившейся системе финансирования лесохозяйственной отрасли. Экономические расчеты необходимых и достаточных затрат для повышения адаптационной способности лесов и увеличения поглощения парниковых газов являются основой принятия управленческих решений в лесном хозяйстве на ближайшую перспективу.

Цель работы

Цель работы — научное обоснование комплекса дополнительных лесохозяйственных мероприятий по снижению выбросов парниковых газов вследствие возрастания лесных пожаров, включая оценку экономических затрат их выполнения на землях лесного фонда, в целях обеспечения низкоуглеродного развития лесного хозяйства, и достижения показателей Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов.

Материалы и методы

В системе лесохозяйственных отношений лесные планы представляют собой часть комплекта программных документов, определяющих перспективное развитие лесного хозяйства на уровне субъекта Федерации или федерального округа. Лесные планы субъектов Федерации охватывают

важные позиции: природно-климатические и лесорастительные условия, зонирование планируемого освоения лесов для различных видов пользования с дифференциацией по интенсивности освоения и экологические принципы хозяйствования [22]. В лесных планах отражается информация о мероприятиях, направленных на сокращение выбросов парниковых газов и увеличение их поглощения лесами.

В настоящем исследовании лесные планы субъектов Федерации использовались для оценки объемов лесохозяйственных мероприятий, направленных на обеспечение баланса парниковых газов в управляемых лесах России [23].

Для определения ежегодного целевого прогнозного значения баланса парниковых газов управляемых лесов России в 2025–2030 гг., а также бюджета углерода в субъектах РФ использовали данные Национального кадастра антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за период 2010–2021 гг. (далее — Кадастр) [24].

Основой для расчета прогнозного значения баланса парниковых газов послужили максимальные показатели бюджета углерода управляемых лесов в каждом из субъектов Федерации за указанный период [25], а также за 2020 г., который был принят за базовый. Все значения бюджета и потерь углерода, указанные в Кадастре, были пересчитаны на величину равной CO_2 -эквивалента баланса парниковых газов [26].

При расчетах нами принято допущение, что бюджет углерода в управляемых лесах субъектов Федерации остается на уровне 2020 г. ежегодно на весь период до 2030 г. [27]. Исходя из бюджета углерода в базовом 2020 г. в каждом субъекте и прогнозируемых величин сокращения ежегодных выбросов парниковых газов от лесных пожаров на землях лесного фонда к 2030 г. по субъектам Федерации и федеральным округам (тыс. т CO_2 -экв./год⁻¹) с учетом целевых показателей ежегодного сокращения площадей лесных пожаров были рассчитаны целевые показатели баланса парниковых газов на 2025–2030 гг. по субъектам Федерации и федеральным округам (тыс. т CO_2 -экв./год⁻¹) путем прибавления к бюджету 2020 г. в субъекте величины сокращенных выбросов.

Для оценки вклада лесохозяйственных мероприятий в баланс парниковых газов в субъектах Российской Федерации, а также расчета его целевых показателей на 2025–2030 годы (по годам) в целях реализации Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года необходимо провести анализ динамики составля-

ющих баланса углерода и его запасов на землях лесного фонда в предыдущее десятилетие [28]. С этой целью исследовали динамику запасов углерода по всем пулам, нетто-поглощение углерода управляемыми лесами по пулам, потери углерода от сплошных рубок, а также от пожаров и прочих причин на основе данных национального Кадастра [24].

Установление планируемого объема расходов на реализацию дополнительных лесохозяйственных мероприятий, направленных на сокращение выбросов парниковых газов и увеличение их поглощения лесами, проводилось с учетом использования нижеследующих принципов и допущений.

1. Расчетный период финансирования мероприятий — 7 лет (2024–2030 гг.).

2. Ежегодный планируемый дополнительный объем лесохозяйственных мероприятий определяется как разница между проектируемым объемом соответствующего мероприятия, заявленном в лесном плане субъекта Российской Федерации, и средним объемом данного мероприятия за 5 лет (2017–2021 гг.).

3. Базовые расходы на единицу объема в рублях устанавливались на основании формы 15-ОИП Отчет о расходах субъекта Российской Федерации на реализацию переданных органам государственной власти субъектов Российской Федерации полномочий Российской Федерации в области лесных отношений. Данные 2021 г. были проиндексированы на 2022 г. на 11,94 % в соответствии с официальными данными Росстата [29]. Данные 2022 г. были проиндексированы на 2023 г. на 5,5 % согласно Прогнозу социально-экономического развития Российской Федерации на 2023 год и на плановый период 2024 и 2025 гг. [30].

4. При отсутствии плановых расходов на лесохозяйственные мероприятия в субъектах РФ принимали за базу расходы в соответствии с приказом Федерального агентства лесного хозяйства от 29.06.2020 г. № 607 «Об утверждении нормативов затрат на оказание государственных работ (услуг) по охране, защите, воспроизводству лесов, лесоразведению и лесоустройству и о признании утратившим силу приказа Федерального агентства лесного хозяйства от 19 июня 2019 г. № 762» [31].

5. В соответствии с Прогнозом социально-экономического развития Российской Федерации на 2023 г. и на плановый период 2024 и 2025 гг., инфляция выйдет на целевой уровень Банка России — 4 % на конец года. На основании данной информации были проиндексированы значения планируемых расходов на единицу объема (руб.) на весь расчетный период (2024–2030 гг.).

6. Расходы на весь дополнительный объем лесохозяйственного мероприятия определяются как произведение планируемого объема работ по мероприятию на принятую единицу измерения проекта и планируемых расходов на единицу объема.

Результаты и обсуждение

Баланс парниковых газов в лесах субъектов Российской Федерации существенно различается, что определяется влиянием различных природно-климатических, экономических и географических факторов [32].

Так, в субъектах Центрального федерального округа (ЦФО) суммарные запасы углерода в биомассе управляемых лесов изменялись в пределах от 3391,2 до 3473,2 млн т С/год. При этом максимальные значения наблюдались вплоть до 2015 г., после чего произошло снижение запасов на 39,7 млн т. С/год. При рассмотрении соотношения ежегодных причин потерь углерода, в качестве основных выделяются потери от деструктивных пожаров и прочих причин, превышающие потери от сплошных рубок лесных насаждений [33]. Среди субъектов ЦФО наибольшее снижение бюджета углерода в лесах за рассматриваемый 11-летний период произошло в Воронежской (–61 %), Ивановской (–44 %), Ярославской (–43 %), Костромской (–36 %) и Рязанской (–33 %) областях.

В регионах Северо-Западного федерального округа (СЗФО) суммарные показатели запасов углерода в управляемых лесах изменяются в диапазоне от 13 547,7 до 13 658,7 млн т С/год. При этом наблюдалось понижение значений вплоть до 2015 г., после чего произошло некоторое увеличение — до 103,2 млн т С/год. Максимальные показатели поглощения углерода управляемыми лесами сохранялись на протяжении всего периода с 2010 по 2015 гг., после чего наблюдалось снижение интенсивности поглощения и к 2021 г. был достигнут минимум (39,1 млн т С/год) с разницей в 4,8 млн т С/год по сравнению с 2015 г.

На протяжении всего времени наблюдался рост выбросов углерода от рубок. Максимальные потери за рассматриваемый период составили 20,1 млн т С/год (2021). Потери от пожаров варьировали слабо — от максимума 1,1 млн т С/год (2014) до минимума 0,6 млн т С/год (2021).

По субъектам СЗФО максимальное снижение бюджета углерода в лесах за 2010–2020 гг. произошло в Вологодской (–104 %) и Архангельской (–76 %) областях, а также в Ненецком АО (–44 %), Костромской (–36 %) и Рязанской (–33 %) областях. Повышение нетто-поглощения лесов характерно для Ленинградской (+19 %) и Мурманской (+3 %) областей.

В субъектах Южного федерального округа (ЮФО) суммарные показатели запасов углерода в управляемых лесах изменялись в диапазоне от 317,3 до 345 млн т С/год, при этом наблюдалось снижение запасов вплоть до 2018 г., после чего к 2021 г. они повысились на 21,4 млн т С/год. В итоге баланс углерода, состоящий из разности поглощения и потерь углерода, характеризуется слабовыраженной тенденцией подсчета, свидетельствующей о ежегодном его повышении в целом по федеральному округу.

В субъектах Северо-Кавказского федерального округа (СКФО) суммарные запасы углерода в управляемых лесах изменялись в пределах от 231,8 млн т С/год в 2010 г. до 238,5 млн т С/год в 2016 г., при этом динамика была слабо выраженной, после чего наблюдалось незначительное снижение показателей на 0,6 млн т С/год, и к 2021 г. суммарные запасы снизились до 237,1 млн т С/год.

Динамика поглощения углерода управляемыми лесами изменялась на протяжении исследуемого периода незначительно. При этом в 2016 г. наблюдался резкий спад — на 0,2 млн т С/год и был достигнут минимум — 0,8 млн т С/год (данные Кадастра), после чего нетто-поглощение резко возросло и к 2018 г. достигло максимума — 1,1 млн т С/год.

В субъектах Приволжского федерального округа (ПФО) суммарные показатели запасов углерода в управляемых лесах варьируют от 5 263,5 до 5 340,3 млн т С/год, при этом наблюдается понижение значений с 2010 по 2016 гг., после чего началось плавное повышение, и в 2021 г. запасы углерода достигли 5 284,1 млн т С/год.

Максимальные показатели поглощения углерода управляемыми лесами сохранялись на протяжении всего периода с 2010 по 2015 гг., после чего наблюдалось снижение интенсивности поглощения, и к 2020 г. был достигнут минимум (35,3 млн т С/год) с разницей в 2,5 млн т С/год по сравнению с максимумом, который был зафиксирован в 2012 г.

Среди субъектов ПФО снижение бюджета углерода в лесах за 2010–2020 гг. произошло во всех субъектах, причем наиболее значительным оно было в Кировской (–51 %), Самарской (–41 %) и Саратовской (–41 %) областях. Наиболее стабильная ситуация отмечена в Пензенской области, где потери углерода лесным фондом составили около 1 % в 2020 г. по сравнению с 2010 г.

В субъектах Уральского федерального округа (УФО) суммарные показатели запасов углерода в управляемых лесах снижались с 2012 г. (13 547,7 млн т С/год) до 2021 г. (111,8 млн т С/год), разница между показателями составила 2 млн т С/год.

На протяжении 2010–2021 гг. показатели выбросов углерода от рубок изменялись слабо, и

максимальные потери углерода за рассматриваемый период составили 6,1 млн т С/год в 2017 г. Потери углерода от пожаров увеличивались от минимума 2 млн т С/год в 2010 г. до максимума 3,6 млн т С/год в 2019 г. В субъектах УФО за 2010–2020 гг. леса потеряли 39 % бюджета углерода в Ямало-Ненецком АО, 34 % — в Челябинской области, 27 % — в Тюменской области. Рост бюджета углерода в лесном фонде за этот период был характерен для Курганской области (+61 %) и Ханты-Мансийского АО (+35 %).

В регионах Сибирского федерального округа (СФО) суммарные показатели запасов углерода в управляемых лесах увеличивались с 2010 по 2016 гг. и достигли максимума (34 775,1 млн т С/год), после чего к 2017 г. произошло резкое снижение значений на 6 407,7 млн т С/год. Среди субъектов СФО снижение бюджета углерода в лесах за 2010–2020 гг. наиболее существенным было в Омской области (–62 %) и Республике Хакасия (–45 %), а также в Томской области (–27 %) и в Красноярском крае (–26 %). Максимальный рост бюджета углерода отмечен в Республике Тыва (+169 %) и Новосибирской области (+64 %). Повышение нетто-поглощения в лесном фонде характерно также для Кемеровской области (+25 %).

В регионах Дальневосточного федерального округа (ДФО) суммарные показатели запасов углерода в управляемых лесах с 2010 по 2016 гг. изменяются от 27 672,4 до 28 909,9 млн т С/год, при этом резкое повышение значений на 6 384,4 млн т С/год наблюдалось с 2017 г., после чего показатели варьировали слабо. В 2021 г. запасы углерода составили 34 125,7 млн т С/год.

В субъектах ДФО леса за 2010–2021 гг. потери углерода оказались наиболее существенными и составили 335 % — в Магаданской области, 181 — в Хабаровском крае, 61 — в Камчатском крае, 53 — в Еврейской автономной области, 48 — в Амурской области и 45 — в Приморском крае. В Республике Саха (Якутия) снижение оказалось на уровне 22 %. Рост бюджета углерода в лесном фонде за этот период был характерен только для Забайкальского края (+15 %). Сравнительно стабильная ситуация наблюдалась в Республике Бурятия (–1 %) и Сахалинской области (+2 %), где изменение бюджета углерода к 2020 г. было незначительным.

Таким образом, в 2021 г. на территориях большинства федеральных округов Российской Федерации наблюдается преимущественное снижение темпов накопления углерода в лесном фонде на 8...39 % по отношению к 2010 г. Некоторое увеличение нетто-поглощения углерода характерно только для малолесных регионов Южного (+17 %) и Северо-Кавказского федерального округов (+3 %). В первую очередь, это обусловлено

увеличением объемов сплошных рубок, потери запасов углерода от которых наиболее значительны в СЗФО, ПФО, СФО.

Только в ДФО потери запасов углерода от пожаров и иных причин заметно превышают таковые от вырубки лесов, а в ЦФО их вклад в расходную часть бюджета углерода практически равноценный. Нами выполнена градация субъектов РФ по уровню изменения бюджета углерода в управляемых лесах и при этом выделено четыре группы изменений:

1) очень значительное изменение бюджета углерода (более 100 %);

2) значительное изменение бюджета углерода (50...100 %);

3) среднее изменение бюджета углерода (20...49 %);

4) незначительное изменение бюджета углерода (0...19 %).

Для дифференциации регионов по уровню изменений бюджета углерода использовали простые темпы прироста/снижения поглощения углерода в лесном фонде в 2021 г., рассчитанные по отношению к 2010 г. (табл. 1).

Такой подход повысил наглядность результатов и позволил выявить самые проблемные и наиболее успешные, с позиции лесохозяйственных мероприятий направленных на сокращение выбросов и потерь углерода, региональные системы лесного хозяйства.

Среди рассматриваемых субъектов Федерации бюджет углерода в лесах за 2010–2021 гг. изменился преимущественно в сторону снижения в 62 субъектах Федерации. Наиболее значительные потери бюджета углерода за эти годы произошли в Магаданской области (335 %), Ненецком АО (235 %), Хабаровском крае (181 %), Вологодской области (104 %), Иркутской области (92 %), Архангельской области (76 %), а также Омской области (62 %), в Камчатском крае (61 %), Воронежской области (61 %), Еврейской АО (53 %) и Кировской области (51 %). Только в 20 субъектах бюджет углерода в лесах либо остался на том же уровне, либо увеличился.

Ключевыми лесохозяйственными мероприятиями, направленными на сокращение выбросов и потерь углерода в региональных системах лесного хозяйства, выступают следующие мероприятия по снижению горимости лесов:

– создание лесных дорог, предназначенных для охраны лесов от пожаров;

– устройство противопожарных минерализованных полос;

– прокладка просек, противопожарных разрывов;

– прочистка противопожарных минерализованных полос и их обновление;

– прочистка просек, уход за противопожарными разрывами;

– мониторинг пожарной опасности в лесах и лесных пожаров путем наземного патрулирования лесов [35].

Целевые показатели ежегодного сокращения площади лесных пожаров определены Постановлением Правительства Российской Федерации от 13.08.2022 г. № 1409 «Об утверждении методики расчета целевых показателей ежегодного сокращения площади лесных пожаров на землях лесного фонда для субъектов Российской Федерации на период до 2030 года» [36].

Результаты прогнозных расчетов ежегодных выбросов парниковых газов от лесных пожаров на землях лесного фонда к 2030 г. по субъектам

Т а б л и ц а 1

Изменение бюджета углерода по субъектам Федерации в управляемых лесах за 2010–2021 гг.

Change in the carbon accumulation by constituent regions in managed forests for 2010–2021

Динамика бюджета углерода	Субъект Федерации
Очень значительное снижение (более 100 %)	Магаданская обл. (–335 %) Ненецкий АО (–235 %) Хабаровский край (–181 %) Вологодская обл. (–104 %)
Значительное снижение (50...100 %)	Иркутская обл. (–92 %) Архангельская обл. (–76 %) Омская обл. (–62 %) Камчатский край (–61 %) Воронежская обл. (–61 %) Еврейская автономная обл. (–53 %) Кировская обл. (–51 %)
Среднее снижение (20...49 %)	Амурская обл. (–48 %) Приморский край (–45 %) Республика Хакасия (–45 %) Ивановская обл. (–44 %) Ярославская обл. (–43 %) Самарская обл. (–41 %) Саратовская обл. (–41 %) Ямало-Ненецкий АО (–39 %) Костромская обл. (–36 %) Республика Алтай (–34 %) Челябинская обл. (–34 %) Рязанская обл. (–33 %) Республика Башкортостан (–29 %) Удмуртская Республика (–29 %) Тульская обл. (–29 %) Курская обл. (–29 %) Томская обл. (–27 %) Тюменская обл. (–27 %) Красноярский край (–26 %) Белгородская обл. (–25 %) Республика Мордовия (–24 %) Нижегородская обл. (–23 %) Ульяновская обл. (–22 %) Республика Саха (Якутия) (–22 %) Владимирская обл. (–22 %) Республика Дагестан (–20 %)

Окончание табл. 1

Динамика бюджета углерода	Субъект Федерации
Незначительное снижение (0...19 %)	Республика Татарстан (-19 %)
	Чувашская республика (-18 %)
	Республика Марий Эл (-17 %)
	Московская обл. (-17 %)
	Астраханская обл. (-16 %)
	Пермская обл. (-16 %)
	Псковская обл. (-15 %)
	Карачаево-Черкесская Республика (-15 %)
	Новгородская обл. (-15 %)
	Республика Адыгея (-14 %)
	Калужская обл. (-13 %)
	Свердловская обл. (-12 %)
	Оренбургская обл. (-12 %)
	Чукотский АО (-11 %)
	Тверская обл. (-11 %)
	Смоленская обл. (-10 %)
	Республика Северная Осетия – Алания (-9 %)
	Липецкая обл. (-7 %)
	Калининградская обл. (-6 %)
Республика Карелия (-6 %)	
Тамбовская обл. (-5 %)	
Алтайский край (-4 %)	
Республика Коми (-4 %)	
Пензенская обл. (-1 %)	
Республика Бурятия (-1 %)	
Очень значительное увеличение (более 100 %)	Ростовская обл. (211 %)
	Республика Тыва (169 %)
Значительное увеличение (50...100 %)	Республика Ингушетия (84 %)
	Новосибирская обл. (64 %)
	Курганская обл. (61 %)
	Республика Калмыкия (58 %)
	Чеченская республика (54 %)
Орловская обл. (51 %)	
Среднее увеличение (20...49 %)	Ставропольский край (47 %)
	Волгоградская обл. (35 %)
	Ханты-Мансийский автономный округ (35 %)
	Кабардино-Балкарская республика (34 %)
	Кемеровская обл. (25 %)
Ленинградская обл. (19 %)	
Незначительное увеличение (0...19 %)	Забайкальский край (15 %)
	Брянская обл. (7 %)
	Мурманская обл. (3 %)
	Сахалинская обл. (2 %)
	Краснодарский край (0 %)

Федерации и федеральным округам (тыс. т CO₂-экв./год⁻¹) с учетом целевых показателей ежегодного сокращения площади лесных пожаров, определенного в нормативно-правовых актах, представлены в табл. 2.

Наибольший вклад в сокращение выбросов до 2030 г. следует ожидать в ДФО (главным образом в шести субъектах — в Республике Саха (Якутия), Хабаровском крае, Магаданской области, Республике Бурятия, Чукотском АО, Амурской

области) — до 99,6 млн т CO₂-экв./год и СФО (преимущественно в Красноярском крае и Иркутской области) — до 32,6 млн т CO₂-экв./год, в УФО — 6,4 млн т CO₂-экв./год. В остальных федеральных округах объем сокращенных выбросов от пожаров на землях лесного фонда не превысит 1,3 млн т CO₂-экв./год.

В целом выполнение комплекса мероприятий, направленных на снижение пожарной опасности в лесах, должно обеспечить сокращение площадей лесных пожаров, что обусловит сокращение выбросов парниковых газов с 264,4 до 142,4 млн т CO₂-экв./год до 2030 г. (рис. 1).

Представленная на рис. 1 диаграмма показывает, что наибольшее ежегодное сокращение выбросов парниковых газов следует ожидать в 2022–2023 гг., которое должно обеспечиваться главным образом за счет субъектов ДФО и СФО — 72,9 млн т CO₂-экв./год. В 2024–2026 гг. прогнозируется ежегодное сокращение выбросов на 14,2 млн т CO₂-экв./год, а в последующие годы — не более 1,6 млн т CO₂-экв./год.

Для определения среднего ежегодного снижения выбросов парниковых газов использовали их прогнозное значение, достигаемое при сокращении среднепятилетнего количества величины лесных пожаров на 50 % за 2017–2021 гг. по РФ (142,4 млн т CO₂), и среднюю за аналогичный период площадь лесных пожаров (4 208 796,47 га).

Экономическая оценка выполнения комплекса дополнительных лесохозяйственных мероприятий, направленных на сокращение выбросов парниковых газов проводилась для критических субъектов, имеющих значительное и очень значительное снижение баланса углерода [37] (см. табл. 1).

В ходе экономических расчетов установлено, что наибольшая потребность в дополнительном финансировании противопожарных мероприятий имеется в Республике Саха (Якутия) (рис. 2).

В тоже время, структура затрат на финансирование отдельных групп противопожарных мероприятий в региональных системах лесного хозяйства различается. Так, наибольшая доля расходов, до 35 % в реализации дополнительных противопожарных мероприятий (от 175,1 до 276,9 млн руб. ежегодно), направленных на сокращение выбросов парниковых газов и увеличение их поглощения лесами для Амурской области, связана с созданием лесных дорог, предназначенных для охраны лесов от пожаров.

Существенно меньший уровень финансирования характерен для таких мероприятий, как «прочистка противопожарных минерализованных полос и их обновление» и «устройство противопожарных минерализованных полос» (см. рис. 2).

Т а б л и ц а 2

Прогнозируемые ежегодные выбросы парниковых газов от лесных пожаров на землях лесного фонда к 2030 г. по федеральным округам (млн т CO₂-экв./год⁻¹) с учетом целевых показателей ежегодного сокращения площади лесных пожаров

Projected annual greenhouse gas emissions from forest fires on forest lands by 2030 by federal districts (million tonnes of CO₂-eq./year⁻¹), taking into account the targets of annual reduction in the area of forest fires

Федеральные округа	Среднее 5-летнее значение	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Российская Федерация	264,4	218,4	191,5	177,3	163	148,8	147,2	145,6	143,9	142,4
Центральный	2	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1
Северо-Западный	2,6	2,3	2,2	2,1	1,9	1,8	1,7	1,5	1,4	1,3
Южный	0,8	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,4
Северо-Кавказский	0,07	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04
Приволжский	2,1	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,1
Уральский	12,8	11,5	10,9	10,3	9,6	8,9	8,4	7,7	7,1	6,4
Сибирский	65,2	50,2	44,2	40,8	37,6	34,3	33,9	33,5	33,1	32,6
Дальневосточный	178,8	149,7	129,9	120,1	110,1	100,1	99,9	99,9	99,7	99,6

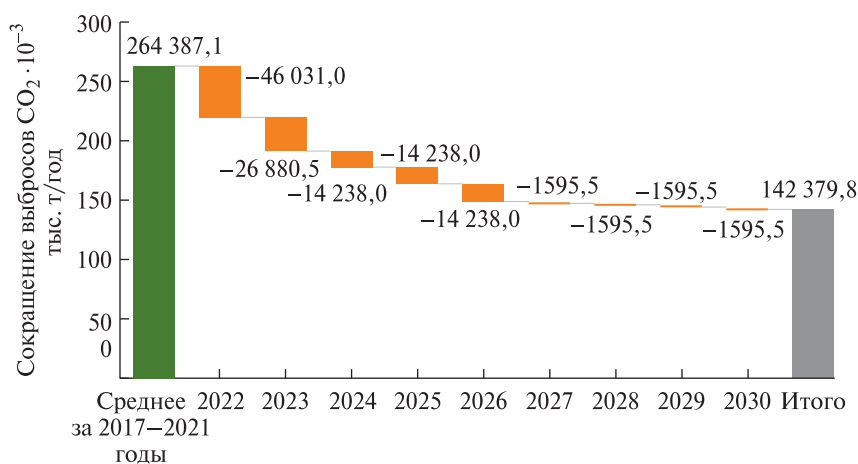


Рис. 1. Суммарный объем ежегодного сокращения выбросов парниковых газов в результате лесных пожаров в Российской Федерации по отношению к среднепятилетнему значению

Fig. 1. Total volume of annual reduction of greenhouse gas emissions from forest fires in the Russian Federation in relation to the five-year average value

Аналогичная ситуация характерна для Забайкальского края, где планируемые расходы на создание лесных дорог, предназначенных для охраны лесов от пожаров, являются наибольшими среди расходов на дополнительные противопожарные мероприятия, а их размер составляет до 30 % в объемах необходимого финансирования. От 40 до 55 % от общего дополнительного финансирования требуется на создание лесных дорог, предназначенных для охраны лесов от пожаров в Бурятии и Магаданской области, соответственно. Для Еврейской автономной области наибольшую

долю расходов (до 36 % необходимого финансирования), составляют затраты на устройство противопожарных минерализованных полос. В то же время, до 25 % объема необходимого финансирования противопожарных мероприятий должно приходиться на работы по прочистке противопожарных минерализованных полос и их обновление.

Для Камчатского края также наиболее затратным дополнительным противопожарным лесохозяйственным мероприятием является устройство противопожарных минерализованных полос,

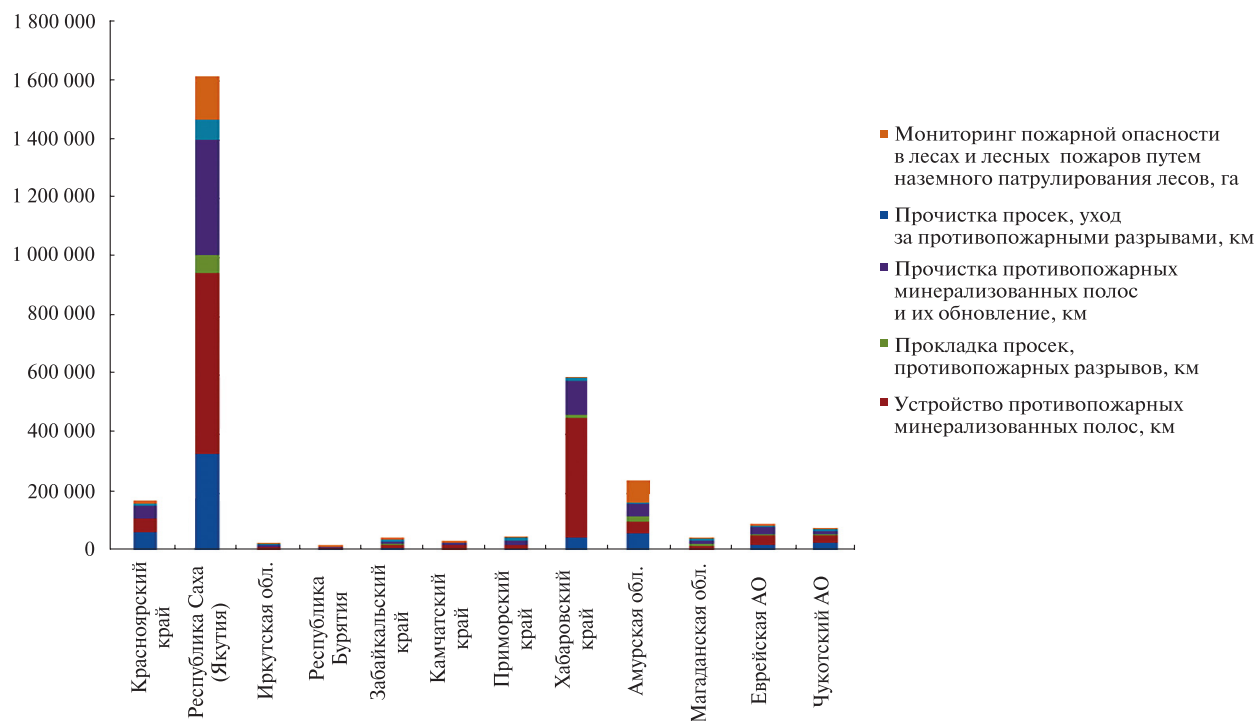


Рис. 2. Планируемые расходы на реализацию дополнительных противопожарных мероприятий, тыс. руб.
 Fig. 2. Planned expenditures for the implementation of additional fire prevention measures, thousand rubles

Т а б л и ц а 3

Планируемый объем расходов на реализацию дополнительных противопожарных мероприятий на 2024–2030 гг. (млн руб.)

Planned expenditures on the implementation of additional firefighting measures for 2024–2030 (RUB mln.)

Наименование субъекта	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	Всего расходов
Амурская область	175,1	204,8	236,7	246,2	256,1	266,3	276,9	1 662,1
Еврейская автономная область	91,6	107,3	123,9	128,8	134	139,4	144,9	870,1
Забайкальский край	49,1	57,4	66,3	68,9	71,7	74,5	77,5	465,3
Камчатский край	38,2	44,6	51,6	53,6	55,8	58,1	60,4	362,3
Магаданская область	92,7	108,5	125,4	130,4	135,6	141	146,6	880,1
Приморский край	39,8	46,6	53,8	56,1	58,3	60,6	63	378,2
Республика Бурятия	25,4	29,7	34,4	35,8	37,2	38,7	40,2	241,4
Республика Саха (Якутия)	1 617,3	1 892,2	2 186,5	2 274	2 365	2 459,6	2 557,9	15 352,4
Хабаровский край	589,9	690,2	797,6	829,5	862,6	897,2	933,1	5 600,1
Чукотский АО	103,8	121,4	140,3	145,9	151,8	157,8	164,2	985,4
Иркутская область	28,3	33,1	38,3	39,8	41,4	43,1	44,7	268,6
Красноярский край	173,5	203	234,6	243,9	253,7	263,8	274,4	1 647,1
Ханты-Мансийский АО	16,3	21,2	26,4	32	38,1	44,5	51,4	229,9
Вологодская область	0,03	0,04	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,4
Республика Карелия	1,1	1,4	1,7	2,2	2,6	3	3,5	15,5
Республика Башкортостан	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,1	1,2	5,2
Воронежская область	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,2
Ростовская область	0,05	0,07	0,08	0,1	0,2	0,2	0,2	0,8
Республика Дагестан	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,2
Итого: расходы по периоду	3 042,5	3 562,1	4 118,3	4 288,1	4 464,7	4 648,7	4 840,4	28 964,8

финансовые ресурсы необходимые для выполнения которого оцениваются нами на уровне 57 % общего объема финансирования. Таким образом, наиболее затратными в структуре финансирования региональных систем лесного хозяйства являются мероприятия по устройству противопожарных минерализованных полос и их обновлению, а также работы по созданию лесных дорог предназначенных для охраны лесов от пожаров.

Отметим, что схожую структуру финансирования мероприятий противопожарного характера имеют Амурская область, Республика Саха (Якутия), Хабаровский и Красноярский края, с объемом финансирования свыше 173 млн руб. в год. При этом на период до 2030 г. следует ожидать увеличения потребности в финансировании превентивных противопожарных мер в среднем на 58...60 % (табл. 3).

Планируемый объем расходов на реализацию дополнительных противопожарных мероприятий за период 2024–2030 гг. для Республики Саха (Якутия) составит 15 352,4 млн руб., для Хабаровского края — 5 600,1 млн руб., для Амурской области — 1 662,1 млн руб., для Красноярского края — 1 647,1 млн руб., в то же время для Воронежской, Вологодской, Ростовской областей и Республики Дагестан необходимо существенно меньшее финансирование в объемах 0,2...0,8 млн руб. Безусловно, предлагаемые дополнительные лесохозяйственные мероприятия, позволяющие изменить ситуацию с лесными пожарами затратны и тяжелы для системы финансирования лесного хозяйства. Однако ежегодно на борьбу с лесными пожарами выделяются финансовые ресурсы существенно превышающие расчетные значения расходов необходимых дополнительных противопожарных мер. Так, и по официальным данным Федерального агентства лесного хозяйства, финансирование мероприятий по охране лесов от пожаров в 2023 г. составило 14,2 млрд руб., в том числе дополнительно привлеченные средства в размере 8,2 млрд руб. пошли на увеличение авиапатрулирования и поддержание пожарно-химических станций. В то же время на проведение мероприятий превентивного характера, обеспечивающих снижение пожарной опасности в лесах дополнительных средств не выделялось. Проверка состояния дел охраны лесов от пожаров, инициированная Счетной палатой Российской Федерации в 2023 г., показала, что регионы не выполняют до 65 % лесохозяйственных мероприятий по причине недофинансирования, а системные финансовые проблемы снижают положительные эффекты борьбы со стихийными бедствиями — лесными пожарами.

Для реализации дополнительных противопожарных мероприятий, направленных на сокра-

щение выбросов парниковых газов и увеличение их поглощения лесами за 2024–2030 гг., по мнению авторов, необходимо дополнительное финансирование, в первую очередь на уровне рассмотренных критических субъектов Российской Федерации в размере 28 964, 8 млн руб.

Выводы

Оценка накопления запасов углерода лесами охарактеризует динамику этого процесса в управляемых лесах федеральных округов. Для ЦФО, СЗФО, ПФО, УФО и СФО запасы углерода в лесах имеют тенденцию к снижению по причине роста лесных пожаров и рубок в сочетании с недостаточно эффективными процессами лесовосстановления.

Дифференциация субъектов РФ по уровню изменения бюджета углерода в управляемых лесах позволила сформировать четыре группы, отражающие его изменение от очень значительного (более 100 %) до незначительного (в пределах 0...19 %). Из 82 субъектов Российской Федерации бюджет углерода в лесах за 2010–2021 гг. изменился преимущественно в сторону снижения в 62 региональных системах лесного хозяйства. В 20 субъектах РФ бюджет углерода в лесах поддерживался на стабильном уровне и имел тенденцию к повышению.

Выделены критические регионы, состояние лесного хозяйства которых, в сочетании с климатическими изменениями не позволяет обеспечить сокращение выбросов или увеличение поглощения парниковых газов ведущих к достижению целевых индикаторов Стратегии низкоуглеродного развития. К таким регионам отнесены 19 субъектов ДФО (Амурская область, Еврейская автономная область, Забайкальский край, Камчатский край, Магаданская область, Приморский край, Республика Бурятия, Республика Саха (Якутия), Хабаровский край, Чукотский автономный округ), СФО (Иркутская область, Красноярский край), УФО (Ханты-Мансийский автономный округ — Югра), СЗФО (Вологодская область, Республика Карелия), ПФО (Республика Башкортостан), ЦФО (Воронежская область), Южного федерального округа (Ростовская область) и СКФО (Республика Дагестан).

Наибольшее количество критических регионов находится в ДФО, что объясняется его удаленностью, слабой развитостью транспорта и логистики, а также значительными запасами лесных ресурсов по сравнению с другими федеральными округами.

Превентивные мероприятия, направленные на пожарной опасности, являются ключевыми в системе снижения горимости лесов. Для осуществления превентивного комплекса противо-

пожарных мероприятий в критических регионах страны необходимо дополнительное финансирование в размере от 3,04 млрд руб. до 4,84 млрд руб. ежегодно. Суммарный объем расходов на реализацию дополнительных противопожарных мероприятий на период 2024–2030 гг. составляет 28,964 млрд руб., и должен обеспечить, при их полномасштабном выполнении сокращение выбросов парниковых газов с 264,4 до 142,4 млн т CO₂-экв./год до 2030 г.

Работа выполнена в рамках государственного задания: FZUR-2024-0001 №124020100131-5

Список литературы

- [1] Petrov A.P., Morkovina S.S. Model of economic organization of the Russian forestry // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: International Jubilee Scientific and Practical Conference «Innovative Directions of Development of the Forestry Complex (FORESTRY-2018)», Voronezh, 04–05 October 2018, v. 226, conference 1. Institute of Physics Publishing: Institute of Physics Publishing, 2019, p. 012041. DOI 10.1088/1755-1315/226/1/012041.
- [2] Рафаилов М.К. Анализ финансовой обеспеченности лесного хозяйства // Общество и экономическая мысль в XXI в.: пути развития и инновации: Материалы X Междунар. науч.-практ. конф. (посвященной 115-летию Воронежского государственного университета), Воронеж, 21 апреля 2022 года. Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2022. С. 107–112.
- [3] Лукина Н.В. Глобальные вызовы и лесные экосистемы // Вестник Российской академии наук, 2020. Т. 90. № 6. С. 528–532.
- [4] Кирпотин С.Н., Березин А.Е., Семенова Н.М. Западная Сибирь как природный коллаيدر: климаторегулирующая функция водно-болотных угодий // Западно-Сибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее: Материалы Шестого Междунар. полевого симп., Ханты-Мансийск, 28 июня – 08 июля 2021 г. Томск: Изд-во Томского университета, 2021. С. 23–26.
- [5] Шварц Е.А., Стариков И.В., Харламов В.С. Новый взгляд: предложения в проект стратегии Развития лесного комплекса // Устойчивое лесопользование, 2020. № 4 (63). С. 2–25. DOI 10.47364/2308-541X_2020_63_4_2
- [6] Морковина С.С., Иванова А.В., Третьяков А.Г. Экономическая оценка альтернатив использования лесных ресурсов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика, 2023. Т. 11. № 1(60). С. 101–116. DOI 10.34220/2308-8877-2023-11-1-101-116
- [7] Гордеев Р.В., Пыжев А.И. Лесная промышленность России в условиях санкций: потери и новые возможности // Вопросы экономики, 2023. № 4. С. 45–66.
- [8] Kharchenko N.N., Moiseeva E.V., Prochorova N.L. Ecosystem Functions of Forest Park Green Belts of Urban Agglomerations as a Factor Improving the Quality of Living Standards in Conditions of Sparsely Wooded Regions // Proceedings of the International Symposium «Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research» (ISEES 2018): International Symposium on Engineering and Earth Sciences, Grozny, 11–16 November 2018. Grozny: Atlantis Press, 2018, pp. 20–25. DOI 10.2991/isees-18.2018.5
- [9] Kharchenko N.N., Morkovina S.S., Kapitonov D.Y., Lisova O.S. Forest ecosystem services in the system of sustainable forest use of sparsely forested regions of Russia // J. of Engineering and Applied Sciences, 2018, v. 13, no. 10, pp. 3567–3572. DOI 10.3923/jeasci.2018.3567.3572
- [10] Куричев Н.К., Птичников А.В., Шварц Е.А., Кренке А.Н. Природно-климатические проекты в России: ключевые проблемы и условия успеха // Известия Российской академии наук. Серия географическая, 2023. Т. 87. № 4. С. 619–636.
- [11] Желдак В.И., Липкина Т.В., Кулагин А.А. Методические вопросы усиления климаторегулирующей роли лесов лесоводственными мерами // Известия Оренбургского государственного аграрного университета, 2013. № 3 (41). С. 232–235.
- [12] Войтов И.В., Шатравко В.Г., Юревич Н.Н. Эколого-ориентированное развитие лесного хозяйства Беларуси в условиях климатических изменений. Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2019. 201 с.
- [13] Семенов М.А. Роль лесных биотехнологий в решении современных проблем лесного хозяйства // Сборник тезисов докладов Науч.-практ. конф. ученых России и Хорватии. М.: МИСИС, 2019. С. 128–129.
- [14] Тараканов А.М., Сурина Е.А., Сеньков А.О. Лесохозяйственные мероприятия по адаптации растительности к изменению климата // Актуальные проблемы лесного комплекса, 2017. № 47. С. 67–71.
- [15] Птичников А.В., Шварц Е.А., Попова Г.А., Байбар А.С. Стратегия низкоуглеродного развития России и роль лесов в ее реализации // Вестник Российской академии наук, 2023. Т. 93. № 1. С. 36–49. DOI 10.31857/S0869587323010073
- [16] Morkovina S.S., Sheshnitsan S.S., Panyavina E.A. Opportunities and Prospects for the Implementation of Reforestation Climate Projects in the Forest Steppe: An Economic Assessment // Forests, 2023, v. 14, no. 8, p. 1611. DOI 10.3390/f14081611
- [17] Ivanova A.V., Rafailov M.K., Sibiryatkina A.V., Matveev S.M. Project management in the forestry complex of Russia // Innovation Management and Education Excellence through Vision 2020: Proceedings of the 31st International Business Information Management Association Conference (IBIMA), Milan, 25–26 April 2018 года. Milan: International Business Information Management Association, 2018, pp. 3771–3777.
- [18] Choi S.D., Chang Y.S., Park B.K. Increase in carbon emissions from forest fires after intensive reforestation and forest management programs // The Science of the Total Environment, 2006, v. 372, no. 1, pp. 225–235. DOI 10.1016/j.scitotenv.2006.09.024
- [19] Morkovina S., Drapalyuk M., Sibiryatkina I., Torzhkov I. Priorities of diversification in forest complex // Proceedings of the 30th International Business Information Management Association Conference, IBIMA 2017 – Vision 2020: Sustainable Economic development, Innovation Management, and Global Growth, Madrid, 08–09 November 2017. Madrid, 2017, pp. 2856–2862.
- [20] Азаренок В.А., Колтунова А.И., Усольцев В.А. Приходная часть углеродного баланса при разных способах рубок в лесах Урала с точки зрения экосистемного лесоводства // Аграрный вестник Урала, 2015. № 9 (139). С. 52–56.
- [21] Chendev Yu., Gennadiev A., Sauer T. Forests advancements to grasslands and their influence on soil formation: Forest Steppe of the Central Russian Upland // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science:

- International scientific and practical conference «Forest ecosystems as global resource of the biosphere: calls, threats, solutions» (Forestry–2019), Voronezh, 23–24 October 2019, v. 392. Voronezh: IOP Publishing Ltd, 2019, p. 012003. DOI 10.1088/1755-1315/392/1/012003
- [22] Ветров Л.С., Чернов М.В., Выродова С.А. Оценка лесного планирования регионального уровня и предложения по его совершенствованию // Труды Санкт-Петербургского науч.-иссл. института лесного хозяйства, 2022. № 3. С. 69–81. DOI 10.21178/2079-6080.2022.3.69
- [23] Филипчук А.Н., Малышева Н.В., Моисеев Б.Н., Страхов В.В. Аналитический обзор методик учета выбросов и поглощения лесами парниковых газов из атмосферы // Лесохозяйственная информация, 2016. № 3. С. 36–85.
- [24] Национальный кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2021 гг. М.: Росгидромет, 2023. 495 с.
- [25] Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Коровин Г.Н. Бюджет углерода управляемых лесов Российской Федерации в 1990–2050 гг.: ретроспективная оценка и прогноз // Метеорология и гидрология, 2013. № 10. С. 73–92.
- [26] Филипчук А.Н., Моисеев Б.Н., Малышева Н.В. Новые аспекты оценки поглощения парниковых газов лесами России в контексте Парижского соглашения об изменении климата // Лесохозяйственная информация, 2017. № 1. С. 88–98.
- [27] Курбатова А.И. Аналитический обзор по современным исследованиям изменений биотических составляющих углеродного цикла // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности, 2020. Т. 28. № 4. С. 428–438. DOI 10.22363/2313-2310-2020-28-4-428-438
- [28] Панявина Е.А. Создание лесных углеродных (карбоновых) полигонов: экономическая составляющая // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика, 2021. Т. 9. № 1(52). С. 26–34. DOI 10.34220/2308-8877-2021-9-1-26-34
- [29] Росстат — Цены, инфляция. URL: <https://rosstat.gov.ru/statistics/price> (дата обращения 05.03.2024).
- [30] Министерство экономического развития РФ. Прогноз социально-экономического развития Российской Федерации на 2023 год и на плановый период 2024 и 2025 годов. URL: prognoz_socialno_ekonom_razvitiya_rf_2023-2025.pdf (economy.gov.ru) (дата обращения 03.03.2024).
- [31] Приказ Рослесхоза от 29.06.2020 N 607 (ред. от 30.12.2020) «Об утверждении нормативов затрат на оказание государственных работ (услуг) по охране, защите, воспроизводству лесов, лесоразведению и лесоустройству и о признании утратившим силу приказа Федерального агентства лесного хозяйства от 19 июня 2019 г. № 762». URL: <https://base.garant.ru/74947552/> (дата обращения 18.03.2024).
- [32] Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Честных О.В. Динамика баланса углерода в лесах федеральных округов Российской Федерации // Вопросы лесной науки, 2018. Т. 1. № 1. С. 1–24. DOI 10.31509/2658-607X-2018-1-1-1-24
- [33] Замолодчиков Д.Г. Оценка пула углерода крупных древесных остатков в лесах России с учетом влияния пожаров и рубок // Лесоведение, 2009. № 4. С. 3–15.
- [34] Slavsky V.A., Litovchenko D.A., Matveev S.M. Assessment of Biological and Environmental Factors Influence on Fire Hazard in Pine Forests: A Case Study in Central Forest-Steppe of the East European Plain // Land, 2023, v. 12, no. 1, p. 103. DOI 10.3390/land12010103
- [35] Указ Президента Российской Федерации от 15.06.2022 № 382 «О мерах по сокращению площади лесных пожаров в Российской Федерации». – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_419392/ (дата обращения 10.10.2023).
- [36] Постановление Правительства РФ от 13.08.2022 № 1409 «Об утверждении методики расчета целевых показателей ежегодного сокращения площади лесных пожаров на землях лесного фонда для субъектов Российской Федерации на период до 2030 года». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_424446/ (дата обращения 07.03.2024).
- [37] Мухин А.С., Филатов Е.Н. Оценка качества и эффективности проведения мероприятий по охране, защите и воспроизводству, использования лесов наземными способами на примере лесничеств Иркутской области // Вестник современных исследований, 2018. № 11.7(26). С. 350–357.

Сведения об авторах

Морковина Светлана Сергеевна — д-р экон. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», tc-sveta@mail.ru

Харченко Николай Николаевич — д-р биол. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», forest.vrn@gmail.com

Шешнищан Сергей Сергеевич — канд. экон. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», sheshnitsan@gmail.com

Панявина Екатерина Анатольевна — канд. экон. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», panyavina-e-a@mail.ru

Иванова Анна Владимировна — канд. экон. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», anna_iv_1989@mail.ru

Водолажский Алексей Николаевич — канд. с.-х. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», vod.a@list.ru

Поступила в редакцию 27.03.2024.

Одобрено после рецензирования 10.06.2024.

Принята к публикации 22.08.2024.

ECOLOGICAL AND ECONOMIC ASSESSMENT OF FORESTRY PRACTICES EFFICIENCY IN MAINTAINING CARBON BALANCE

S.S. Morkovina, N.N. Kharchenko✉, S.S. Sheshnitsan, E.A. Panyavina, A.V. Ivanova, A.I. Vodolazhsky

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva st., 394087, Voronezh, Russia

forest.vrn@gmail.com

The issues of effectiveness of forestry measures aimed at reducing the burning of forests in regional forestry systems are considered. It has been established that in 2021, in the territories of most Federal Districts of the Russian Federation, there is a predominant decrease in the rate of carbon accumulation in the forest fund by 8...39 % compared to 2010. Based on the analysis of forest planning documents, the gradation of the subjects of the Federation according to the level of change in the carbon budget was performed. During the period under review, there were negative trends in reducing the carbon budget in forests in 62 regions of the Russian Federation. The largest number of critical regions are located in the Far Eastern Federal District, which is explained by its remoteness, poor development of transport and logistics, as well as significant reserves of forest resources compared to other federal districts. It was found that in critical regions during the analyzed period, carbon losses in the forest fund amounted to 335% in the Magadan Region, up to 235 % in the Nenets Autonomous Okrug and more than 180 % of the carbon budget in the Khabarovsk Territory. A list of the most significant measures aimed at reducing carbon emissions and losses in regional forestry systems has been identified. Measures to reduce the burning of forests are classified as key. The comprehensive implementation of such measures will lead to a reduction in greenhouse gas emissions from 264,4 to 142,4 million tons of CO₂-eq./the year until 2030. The necessary amount of financing for additional fire-fighting measures for the period 2024–2030 has been determined, amounting to 28,964,8 million rubles.

Keywords: forestry, economics, forest management, carbon balance, climate, forest fires

Suggested citation: Morkovina S.S., Kharchenko N.N., Sheshnitsian S.S., Panyavina E.A., Ivanova A.V., Vodolazhskiy A.I. *Ekologo-ekonomicheskaya otsenka rezul'tativnosti kompleksa lesokhozyaystvennykh praktik v voprosakh podderzhaniya uglerodnogo balansa* [Ecological and economic assessment of forestry practices efficiency in maintaining carbon balance]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 5, pp. 104–117. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-104-117

References

- [1] Petrov A.P., Morkovina S.S. Model of economic organization of the Russian forestry. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: International Jubilee Scientific and Practical Conference «Innovative Directions of Development of the Forestry Complex (FORESTRY–2018)», Voronezh, 04–05 October 2018, v. 226, conference 1. Institute of Physics Publishing: Institute of Physics Publishing, 2019, p. 012041. DOI 10.1088/1755-1315/226/1/012041.
- [2] Rafailov M.K. *Analiz finansovoy obespechennosti lesnogo khozyaystva* [Analysis of financial security of forestry]. *Obshchestvo i ekonomicheskaya mysl' v XXI v.: puti razvitiya i innovatsii: Materialy Kh Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (posvyashchennoy 115-letiyu Universiteta)* [Society and economic thought in the 21st century: paths of development and innovation: Proceedings of the X International scientific and practical conference (dedicated to the 115th anniversary of the University)], Voronezh, April 21, 2022. Voronezh: Publishing and printing center «Scientific book», 2022, pp. 107–112.
- [3] Lukina N.V. *Global'nye vyzovy i lesnye ekosistemy* [Global challenges and forest ecosystems]. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences], 2020, v. 90, no. 6, pp. 528–532.
- [4] Kirpotin S.N., Berezin A.E., Semenova N.M. *Zapadnaya Sibir' kak prirodnyy kollayder: klimatoreguliruyushchaya funktsiya vodno-bolotnykh ugodiy* [Western Siberia as a natural collider: climate-regulating function of wetlands]. *Zapadno-Sibirskie torfyaniki i tsikl ugleroda: proshloe i nastoyashchee: Mater. Shestogo Mezhdunarodnogo polevogo simpoziuma* [West Siberian peatlands and the carbon cycle: past and present: mater. Sixth International Field Symposium], Khanty-Mansiysk, June 28 – July 8, 2021. Tomsk: Tomsk University Publishing House, 2021, pp. 23–26.
- [5] Shvarts E.A., Starikov I.V., Kharlamov V.S. *Novyy vzglyad: predlozheniya v projekt strategii Razvitiya lesnogo kompleksa* [A New Look: Proposals for the Draft Strategy for the Development of the Forest Complex]. *Ustoychivoe lesopol'zovanie* [Sustainable Forest Management], 2020, no. 4 (63), pp. 2–25. DOI 10.47364/2308-541X_2020_63_4_2
- [6] Morkovina S.S., Ivanova A.V., Tret'yakov A.G. *Ekonomicheskaya otsenka al'ternativ ispol'zovaniya lesnykh resursov* [Economic Assessment of Alternatives for the Use of Forest Resources]. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Current Directions of Scientific Research in the 21st Century: Theory and Practice], 2023, v. 11, no. 1 (60), pp. 101–116. DOI 10.34220/2308-8877-2023-11-1-101-116
- [7] Gordeev R.V., Pyzhev A.I. *Lesnaya promyshlennost' Rossii v usloviyakh sanktsiy: poteri i novye vozmozhnosti* [Russian forest industry under sanctions: losses and new opportunities]. *Voprosy ekonomiki* [Voprosy ekonomiki], 2023, no. 4, pp. 45–66.
- [8] Kharchenko N.N., Moiseeva E.V., Prochorova N.L. Ecosystem Functions of Forest Park Green Belts of Urban Agglomerations as a Factor Improving the Quality of Living Standards in Conditions of Sparsely Wooded Regions. *Proceedings of the International Symposium «Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research» (ISEES 2018): International Symposium on Engineering and Earth Sciences*, Grozny, 11–16 November 2018. Grozny: Atlantis Press, 2018, pp. 20–25. DOI 10.2991/isees-18.2018.5

- [9] Kharchenko N.N., Morkovina S.S., Kapitonov D.Y., Lisova O.S. Forest ecosystem services in the system of sustainable forest use of sparsely forested regions of Russia. *J. of Engineering and Applied Sciences*, 2018, v. 13, no. 10, pp. 3567–3572. DOI 10.3923/jeasci.2018.3567.3572
- [10] Kurichev N.K., Ptichnikov A.V., Shvarts E.A., Krenke A.N. *Prirodno-klimaticheskie proekty v Rossii: klyucheveye problemy i usloviya uspekha* [Natural and climate projects in Russia: key problems and conditions for success]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya geograficheskaya* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical series], 2023, v. 87, no. 4, pp. 619–636.
- [11] Zheldak V.I., Lipkina T.V., Kulagin A.A. *Metodicheskie voprosy usileniya klimatoreguliruyushchey roli lesov lesovodstvennymi merami* [Methodological issues of enhancing the climate-regulating role of forests by forestry measures]. *Izvestiya OGAU*, 2013, no. 3 (41), pp. 232–235.
- [12] Voytov I.V., Shatravko V.G., Yurevich N.N. *Ekologoorientirovannoe razvitie lesnogo khozyaystva Belarusi v usloviyakh klimaticheskikh izmeneniy* [Ecologically oriented development of forestry in Belarus in the context of climate change]. Minsk: Belarusian State Technological University, 2019, 201 p.
- [13] Semenov M.A. *Rol' lesnykh biotekhnologiy v reshenii sovremennykh problem lesnogo khozyaystva* [The role of forest biotechnologies in solving modern forestry problems]. *Sbornik tezisov dokladov Nauchno-prakticheskoy konferentsii uchenykh Rossii i Khorvatii* [Collection of abstracts of reports of the Scientific and Practical Conference of Scientists from Russia and Croatia]. Moscow: MISIS, 2019, pp. 128–129.
- [14] Tarakanov A.M., Surina E.A., Sen'kov A.O. *Lesokhozyaystvennye meropriyatiya po adaptatsii rastitel'nosti k izmeneniyu klimata* [Forestry measures to adapt vegetation to climate change]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex], 2017, no. 47, pp. 67–71.
- [15] Ptichnikov A.V., Shvarts E.A., Popova G.A., Baybar A.S. *Strategiya nizkouglerodnogo razvitiya Rossii i rol' lesov v ee realizatsii* [Low-carbon development strategy of Russia and the role of forests in its implementation]. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences], 2023, v. 93, no. 1, pp. 36–49. DOI 10.31857/S0869587323010073
- [16] Morkovina S.S., Sheshnitsan S.S., Panyavina E.A. Opportunities and Prospects for the Implementation of Reforestation Climate Projects in the Forest Steppe: An Economic Assessment. *Forests*, 2023, v. 14, no. 8, p. 1611. DOI 10.3390/f14081611
- [17] Ivanova A.V., Rafailov M.K., Sibiryatkina A.V., Matveev S.M. Project management in the forestry complex of Russia. *Innovation Management and Education Excellence through Vision 2020: Proceedings of the 31st International Business Information Management Association Conference (IBIMA)*, Milan, 25–26 April 2018 года. Milan: International Business Information Management Association, 2018, pp. 3771–3777.
- [18] Choi S.D., Chang Y.S., Park B.K. Increase in carbon emissions from forest fires after intensive reforestation and forest management programs. *The Science of the Total Environment*, 2006, v. 372, no. 1, pp. 225–235. DOI 10.1016/j.scitotenv.2006.09.024
- [19] Morkovina S., Drapalyuk M., Sibiryatkina I., Torzhkov I. Priorities of diversification in forest complex. *Proceedings of the 30th International Business Information Management Association Conference, IBIMA 2017 – Vision 2020: Sustainable Economic development, Innovation Management, and Global Growth*, Madrid, 08–09 November 2017. Madrid, 2017, pp. 2856–2862.
- [20] Azarenok V.A., Koltunova A.I., Usol'tsev V.A. *Prikhodnaya chast' uglerodnogo balansa pri raznykh sposobakh rubok v lesakh Urala s tochki zreniya ekosistemnogo lesovodstva* [Income part of the carbon balance for different logging methods in the Ural forests from the point of view of ecosystem forestry]. *Agrarnyy vestnik Urala* [Agrarian Bulletin of the Urals], 2015, no. 9 (139), pp. 52–56.
- [21] Chendev Yu., Gennadiev A., Sauer T. Forests advancements to grasslands and their influence on soil formation: Forest Steppe of the Central Russian Upland. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: International scientific and practical conference «Forest ecosystems as global resource of the biosphere: calls, threats, solutions» (Forestry–2019)*, Voronezh, 23–24 October 2019, v. 392. Voronezh: IOP Publishing Ltd, 2019, p. 012003. DOI 10.1088/1755-1315/392/1/012003
- [22] Vetrov L.S., Chernov M.V., Vyrodova S.A. *Otsenka lesnogo planirovaniya regional'nogo urovnya i predlozheniya po ego sovershenstvovaniyu* [Assessment of regional forest planning and proposals for its improvement]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva* [Proceedings of the St. Petersburg Forestry Research Institute], 2022, no. 3, pp. 69–81. DOI 10.21178/2079-6080.2022.3.69
- [23] Filipchuk A.N., Malysheva N.V., Moiseev B.N., Strakhov V.V. *Analiticheskiy obzor metodik ucheta vybrosov i pogloshcheniya lesami parnikovykh gazov iz atmosfery* [Analytical review of methods for accounting for emissions and absorption of greenhouse gases from the atmosphere by forests]. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information], 2016, no. 3, pp. 36–85.
- [24] Natsional'nyy kadastr antropogennykh vybrosov iz istochnikov i absorptsii poglotitelyami parnikovykh gazov, ne reguliruemyykh Monreal'skim protokolom za 1990–2021 gg. [National inventory of anthropogenic emissions from sources and removals by sinks of greenhouse gases not regulated by the Montreal Protocol for 1990 – 2021]. Moscow: Rosgidromet, 2023, 479 p.
- [25] Zamolodchikov D.G., Grabovskiy V.I., Korovin G.N. *Byudzhnet ugleroda upravlyaemykh lesov Rossiyskoy Federatsii v 1990–2050 gg.: retrospektivnaya otsenka i prognoz* [Carbon budget of managed forests of the Russian Federation in 1990–2050: retrospective assessment and forecast]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and hydrology], 2013, no. 10, pp. 73–92.
- [26] Filipchuk A.N., Moiseev B.N., Malysheva N.V. *Novye aspekty otsenki pogloshcheniya parnikovykh gazov lesami Rossii v kontekste Parizhskogo soglasheniya ob izmenenii klimata* [New aspects of assessing greenhouse gas absorption by Russian forests in the context of the Paris Agreement on climate change]. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information], 2017, no. 1, pp. 88–98.
- [27] Kurbatova A.I. *Analiticheskiy obzor po sovremennym issledovaniyam izmeneniy bioticheskikh sostavlyayushchikh uglerodnogo tsikla* [Analytical review of modern studies of changes in biotic components of the carbon cycle]. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series: Ecology and Life Safety], 2020, v. 28, no. 4, pp. 428–438. DOI 10.22363/2313-2310-2020-28-4-428-438

- [28] Panyavina E.A. *Sozdanie lesnykh ugleodnykh (karbonovykh) poligonov: ekonomicheskaya sostavlyayushchaya* [Creation of forest carbon (carbon) polygons: economic component]. Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika [Current areas of scientific research in the 21st century: theory and practice], 2021, v. 9, no. 1(52), pp. 26–34. DOI 10.34220/2308-8877-2021-9-1-26-34
- [29] Rosstat — *Tseny, inflyatsiya* [Rosstat — Prices, inflation]. Available at: <https://rosstat.gov.ru/statistics/price> (accessed 05.03.2024).
- [30] *Ministerstvo Ekonomicheskogo razvitiya RF. Prognoz sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii na 2023 god i na planovyy period 2024 i 2025 godov* [Ministry of Economic Development of the Russian Federation. Forecast of socio-economic development of the Russian Federation for 2023 and for the planning period of 2024 and 2025]. Available at: [prognoz_socialno_ekonom_razvitiya_rf_2023-2025.pdf](https://economy.gov.ru/prognoz_socialno_ekonom_razvitiya_rf_2023-2025.pdf) (economy.gov.ru) (accessed 03.03.2024).
- [31] *Prikaz Rosleskhoza ot 29.06.2020 № 607 (red. ot 30.12.2020) «Ob utverzhdenii normativov zatrat na okazanie gosudarstvennykh rabot (uslug) po okhrane, zashchite, vosproizvodstvu lesov, lesorazvedeniyu i lesoustroystvu i o priznanii utrativshim silu prikaza Federal'nogo agentstva lesnogo khozyaystva ot 19 iyunya 2019 g. № 762»* [Order of the Federal Forestry Agency of June 29, 2020 no. 607 (as amended on December 30, 2020) «On approval of cost standards for the provision of public works (services) for the protection, conservation, reproduction of forests, afforestation and forest management and on recognizing as invalid the order of the Federal Forestry Agency of June 19, 2019 no. 762»]. Available at: <https://base.garant.ru/74947552/> (accessed 18.03.2024).
- [32] Zamolodchikov D.G., Grabovskiy V.I., Chestnykh O.V. *Dinamika balansa ugleroda v lesakh federal'nykh okrugov Rossiyskoy Federatsii* [Dynamics of the carbon balance in the forests of the federal districts of the Russian Federation]. *Voprosy lesnoy nauki* [Issues of forest science], 2018, v. 1, no. 1, pp. 1–24. DOI 10.31509/2658-607X-2018-1-1-1-24
- [33] Zamolodchikov D.G. *Otsenka pula ugleroda krupnykh drevesnykh ostatkov v lesakh Rossii s uchedom vliyaniya pozharov i rubok* [Assessment of the carbon pool of large woody debris in Russian forests taking into account the impact of fires and logging]. *Lesovedenie*, 2009, no. 4, pp. 3–15.
- [34] Slavsky V.A., Litovchenko D.A., Matveev S.M. *Assessment of Biological and Environmental Factors Influence on Fire Hazard in Pine Forests: A Case Study in Central Forest-Steppe of the East European Plain*. *Land*, 2023, v. 12, no. 1, p. 103. DOI 10.3390/land12010103
- [35] *Ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 15.06.2022 № 382 «O merakh po sokrashcheniyu ploshchadi lesnykh pozharov v Rossiyskoy Federatsii»* [Decree of the President of the Russian Federation of 15.06.2022 no. 382 «On measures to reduce the area of forest fires in the Russian Federation»]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_419392/ (accessed 10.10.2023).
- [36] *Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 13.08.2022 № 1409 «Ob utverzhdenii metodiki rascheta tselevykh pokazateley ezhegodnogo sokrashcheniya ploshchadi lesnykh pozharov na zemlyakh lesnogo fonda dlya sub'ektov Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda»* [Resolution of the Government of the Russian Federation of 13.08.2022 no. 1409 «On approval of the methodology for calculating target indicators for the annual reduction in the area of forest fires on forest fund lands for the constituent entities of the Russian Federation for the period up to 2030»]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_424446/ (accessed 07.03.2024).
- [37] Mukhin A.S., Filatov E.N. *Otsenka kachestva i effektivnosti provedeniya meropriyatiy po okhrane, zashchite i vosproizvodstvu, ispol'zovaniya lesov nazemnymi sposobami na primere lesnichestv Irkutskoy oblasti* [Assessment of the quality and effectiveness of measures to protect, preserve and restore, use forests by land methods on the example of forestry enterprises of the Irkutsk region]. *Vestnik sovremennykh issledovaniy* [Bulletin of modern studies], 2018, no. 11.7 (26), pp. 350–357.

The work was performed within the framework of the state assignment: FZUR-2024-0001 No. 124020100131-5

Authors' information

Morkovina Svetlana Sergeevna — Dr. Sci. (Economy), Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, tc-sveta@mail.ru

Kharchenko Nikolay Nikolaevich — Dr. Sci. (Biology), Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, forest.vrn@gmail.com

Sheshnitsan Sergey Sergeevich — Cand. Sci. (Economy), Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, sheshnitsan@gmail.com

Panyavina Ekaterina Anatol'evna — Cand. Sci. (Economy), Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, panyavina-e-a@mail.ru

Ivanova Anna Vladimirovna — Cand. Sci. (Economy), Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, anna_iv_1989@mail.ru

Vodolazhskiy Aleksey Nikolaevich — Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, vod.a@list.ru

Received 27.03.2024.

Approved after review 10.06.2024.

Accepted for publication 22.08.2024.

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

ИЗУЧЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗЛЕТА *IPS TYPOGRAPHUS* (LINNAEUS, 1758) С ПОМОЩЬЮ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО ПОРОШКА

А.А. Чалкин¹✉, С.Н. Лябзина^{2,3}, О.А. Кулинич^{1,4}

¹ФГБУ «Всероссийский центр карантина растений» (ФГБУ «ВНИИКР»), Россия, 140150, Московская область, г.о. Раменский, рп. Быково, ул. Пограничная, д. 32

²Североморский филиал ФГБУ «Всероссийский центр карантина растений» (ФГБУ «ВНИИКР»), Россия, 185003, Республика Карелия, г. Петрозаводск, Лососинская набережная, д. 7

³ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет» (ПетрГУ), Россия, 185910, Республика Карелия, г. Петрозаводск, пр. Ленина, д. 33

⁴Центр паразитологии Института проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова Российской академии наук (ИПЭЭ РАН), Россия, 119071, Москва, Ленинский проспект, д. 33

chalkin10@ya.ru

Представлены результаты исследования дальности и направления разлета короледа-типографа (*Ips typographus* L.) с мечением и повторным отловом имаго в условиях открытого биоценоза в Республике Карелия. Исследования, проведенные в двух повторностях, показали, что для массовой маркировки короедов подходит мелкодисперсный порошок люминофор ярко-зеленого или голубого оттенков с длительным послесвечением, частицы которого в течение нескольких дней остаются на теле короледа и хорошо заметны под ультрафиолетовым свечением, а меченые особи сохраняют свою активность. Отмечено, что порошок равномерно распределяется по всем участкам тела насекомого, концентрируясь под элитрами и на волосках. Анализ данных показывает, что в эксперименте 16 % (126 имаго из 782) меченых особей короледа-типографа отловлено повторно в феромонные ловушки барьерно-вороночного типа с видоспецифичным агрегационным аттрактантом, которые были размещены в северо-западном, юго-западном, северо-восточном и юго-восточном направлениях от точки выпуска короедов по 6 шт. на сторону с интервалом в 0,2 км. Установлено, что при повторном отлове максимальное количество жуков (60 %) отловлено в юго-западном направлении на расстоянии от 1 км от точки выпуска. Установлено, что расселение жуков короледа-типографа с учетом розы ветров происходило против направления преобладающего ветра, переносящего аттрактивные вещества.

Ключевые слова: *Ips typographus*, короледа-типограф, феромонные ловушки, люминофор, мечение с повторным отловом

Ссылка для цитирования: Чалкин А.А., Лябзина С.Н., Кулинич О.А. Изучение направления разлета *Ips typographus* (Linnaeus, 1758) с помощью люминесцентного порошка // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 5. С. 118–128. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-118-128

Короледа-типограф (*Ips typographus* Linnaeus, 1758) является доминирующим видом среди ксилобионтов еловых ценозов и по-прежнему остается главной угрозой, приводящей к уничтожению лесных массивов ввиду частых вспышек его численности. В лесных биоценозах Карелии короледа-типограф преобладает среди насекомых ксилофильного комплекса еловых экосистем и отмечен на всей территории республики [1]. Численность короледа-типографа не имеет резко выраженных значений и находится в пределах нормы. Короледа-типограф в лесном хозяйстве имеет важное значение, как с экологической, так и с экономической точки зрения, в частности для прогнозирования его распространения и предотвращения гибели деревьев [2].

Заселение ели короледом-типографом и отмирание деревьев происходит преимущественно по стволу типу, при этом наибольшей уязвимостью отличаются старовозрастные ели

(100...120 лет), произрастающие в ельниках зеленомошниках на вершинах и склонах холмов.

Короледа-типограф является вторичным вредителем, атакующим деревья, которые уже подверглись негативному воздействию окружающей среды или стрессу.

Особенности возрастного состава, влагообеспеченность древостоев, проведение лесотехнических мероприятий ограничивают потенциальную вероятность возникновения и распространения масштабных очагов массового размножения не только короледа-типографа, но и других ксилофильных насекомых.

Короледа-типограф размножается в древесине усыхающих елей, однако при большой численности имаго способны атаковать деревья без внешних признаков ослабления [3, 4]. В Российской Федерации ель является товаром для международной торговли. Страны-импортеры выдвигают условия по отсутствию некоторых видов короедов в экспортируемой древесной продукции из Российской Федерации [5].

Распространение полетом — ключевая часть жизненного цикла короледа-типографа. Это обязательная фаза, которая происходит от молодого имаго до репродуктивной особи. Фаза расселения обязательна для всех видов короедов, но не всегда происходит в каждом поколении и чаще всего она отсутствует, если происходит повторное заселение в одном и том же месте [6]. Жукам необходимо расселяться, поскольку предоставленные ресурсы истощаются. После вылета некоторые особи начинают рассеиваться по ветру до тех пор, пока не встретится привлекательный семиохимический сигнал, а затем происходит ориентированный полет против ветра.

Ветровальные и усыхающие деревья являются кормовой базой для ксилофагов. В поисках новых участков они активно расселяются, и одной из причин миграции является истощение питательных ресурсов. Способность к полету сильно различается у разных видов короедов. Так, в некоторых трибах *Scolytinae* крылья у самцов редуцированы, и они теряют способность к полету (*Hypothenemus*, *Xyleborinus*, *Xyleborus* и др.). Во время расселительного полета короеды могут перемещаться на небольшие расстояния (*Phloeotribus spinulosus* (Rey, 1883)) или разлетаться на десятки километров (виды родов *Dendroctonus* Erichson, 1936 и *Scolytus* Latreille, 1804) [6–8].

Во время процесса поиска короедом растения-хозяина и последующего его заселения выделяют два типа полета: первоначальный полет короледа происходит при ветре до тех пор, пока жуки не почувствуют изменчивые сигналы и, реагируя на них, начнут полет против ветра. Физиологическое состояние отдельных короедов влияет на реакцию на летучие семиохимические сигналы у различных видов короедов по-разному. Около 25...30% *I. typographus* реагируют на ловушки с феромонами сразу после вылета, а большая часть популяции приземлится на потенциальных «хозяев» спустя некоторое время [9]. Проведенные исследования *I. typographus* показывают, что самые высокие реакции антенн на семиохимические вещества у жуков обнаруживаются после полета в течение 0...5 ч. Чувствительность усиков ниже у жуков, которые совершают очень длительные полеты (24–48 ч) [10].

Для измерения летной способности и расселения короедов разработаны как прямые, так и косвенные методы измерения полета и прогнозирования движения. При прямом исследовании устанавливают их способность к длительному перемещению, которую чаще всего измеряют в лабораторных условиях с помощью летных мельниц [11]. Эти устройства состоят из вращающегося рычага, подвешенного над центральной точкой поворота. Полет короледа-типографа на летных мельницах может достигать 50 км и более [12]. Например, дальность полета лубоеда (*Dendroctonus*

ponderosae Hopkins) на летных мельницах изменяется в среднем от 2 до 6 км, однако отдельные особи могут пролетать расстояние более 20 км [7]. Такое различие объясняется морфологическими или физиологическими факторами. Исследования видов *D. ponderosae* и *I. typographus* на летной мельнице доказывают, что жуки с одинаковым размером и массой обладают различной летной способностью [13–15]. Хотя этот метод полезен для измерения таких летных характеристик, как расстояние и скорость, его нельзя использовать для измерения ориентированного полета.

Воздействие на жуков аттрактантов во время исследования на летной мельнице дает возможность измерить влияние семиохимических веществ на склонность к полету и поворот во время полета, но препятствует ориентированному полету. На частоту взмахов крыльев влияют в основном условия окружающей среды, в частности температура воздуха, летательные мышцы и морфология крыльев особи, что в совокупности определяет ее способность к полету. Частота взмахов крыльев увеличивается с ростом нагрузки на крыло (масса тела/площадь крыла), инерции и сопротивления [14]. В результате воздействия различных факторов, связанных с удержанием имаго, данные полета, полученные в летной мельнице, могут использоваться только в относительном, а не в абсолютном смысле.

По мнению ряда авторов [16–18], очень трудными являются исследования расселения жуков в естественной среде обитания с использованием мечения и повторного отлова в феромонные ловушки для получения точного представления об их полете. Такие полевые исследования отличаются сложностью проведения и интерпретации, хотя могут предоставить информацию о минимальной пропускной способности полета и самом полете, ориентированном в пределах насаждения. Ловушки с приманкой позволяют оценить привлекательность жуков к различным сигналам и наличие жуков в определенных средах обитания.

Измерить перемещение жуков в режиме реального времени сложно. В последнее время для этого применяют современные методы, основанные на моделировании потенциального расселения [19–21].

Для изучения распределения короледа-типографа при полете используют различные методы маркировки. Из литературных источников известно, что перед выпуском жуков маркируют краской, цветным порошком или гравировкой на надкрыльях [10, 21–24]. Порошок наиболее удобен при массовом варианте мечения, что позволяет в разы увеличить количество окрашенных особей [22, 23]. В дальнейшем меченых жуков повторно отлавливают с помощью ловчих деревьев [25, 26] или феромонных ловушек [23, 26].

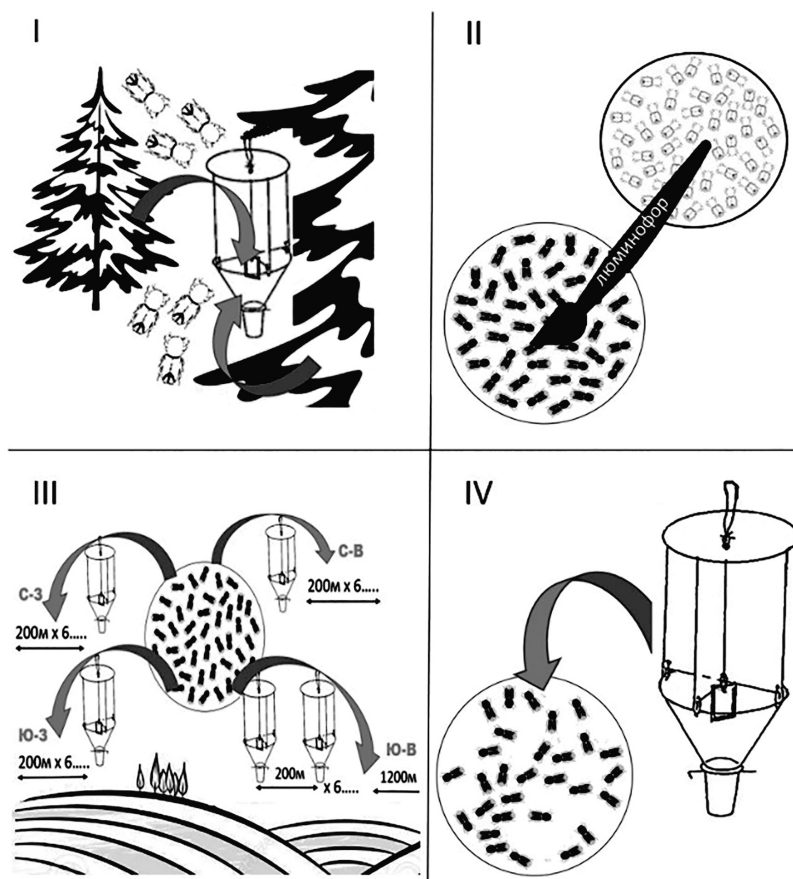


Рис. 1. Этапы исследований направления и дальности разлета имаго *Ips typographus*: I — отлов жуков в естественных биоценозах; II — мечение жуков люминофором; III — размещение ловушек и выпуск меченных имаго; IV — отлов меченных насекомых

Fig. 1. Stages of research on the direction and range of dispersal of adults of *Ips typographus*: I — catching beetles in natural biocenoses; II — marking of beetles with a phosphor; III — placement of traps and release of marked adults; IV — catching marked insects

Цель работы

Цель работы — изучение направления и дальности разлета короеда-типографа путем нанесения на поверхность его тела красящего пигмента люминофора с последующим контролем за перемещением с помощью феромонных ловушек.

Объекты и методы исследования

Исследование проводили в Карелии (Прионежский район, п. Шуя) в агроценозах на площади более 20 га (61°89' с. ш., 34°21' в. д.) в 2022 г. Для отлова имаго короеда-типографа использовали феромонные ловушки барьерно-вороночного типа производства ФГБУ «ВНИИКР» с агрегационным веществом, которое представляет собой трехкомпонентную смесь: ипсдиенол (I), 2-метил-3-бутен-2-ол (II), цис-вербенол (III).

При постановке опытов учитывали некоторые абиотические факторы. Известно, что особенно сильное влияние на полет жуков оказывают тем-

пература и влажность окружающей среды [27]. Экспериментальную часть работ проводили в июне и июле, когда положительные значения температуры воздуха на территории Республики Карелия наиболее высокие. Погодные условия в период первого и второго экспериментов незначительно отличались. В период первого выпуска (с 11 по 14 июня) средняя дневная температура воздуха составляла 17 °С, относительная влажность воздуха — 60...70 % при южном или юго-западном ветре скоростью 2...4 м/с, переменной облачности, кратковременных и ливневых осадках. В период второго выпуска (с 22 по 28 июля) климатические условия отличались от первого повышенной средней дневной температурой окружающей среды (21 °С), пониженной относительной влажностью воздуха (55...65 %) и южным либо юго-западным слабым ветром и слабыми осадками.

Для изучения направления и дальности полета эксперимент разделили на четыре этапа (рис. 1).

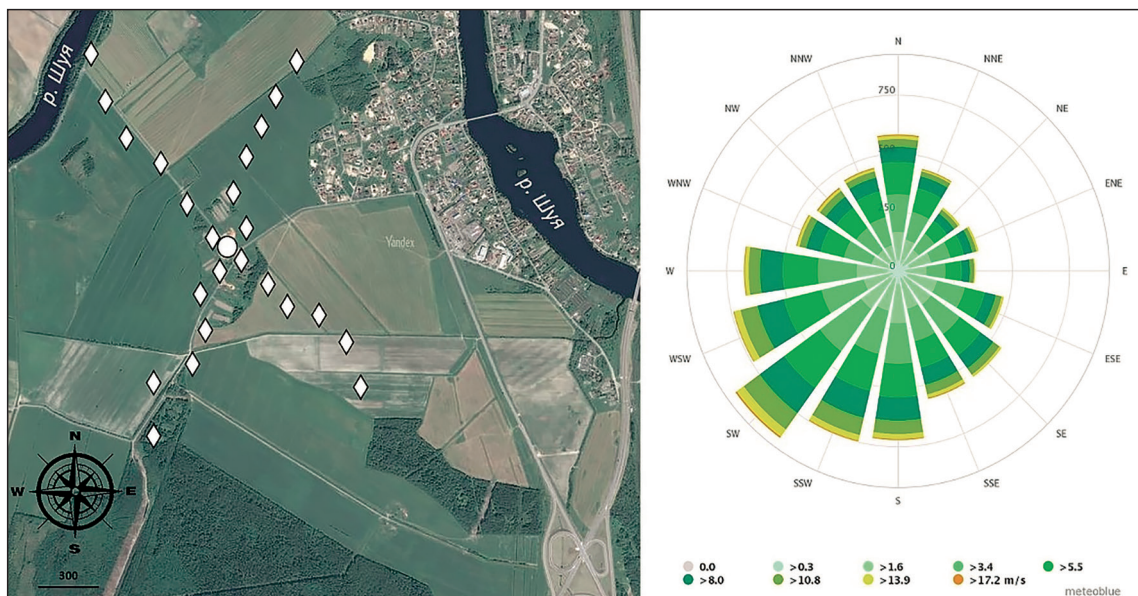


Рис. 2. Место проведения исследования (Прионежский район, Республика Карелия): *a* — схема размещения барьерно-вороночных ловушек в агроценозах: кружок — место выпуска *Ips typographus*, ромбы — размещение барьерно-вороночных ловушек («Яндекс карты» <https://yandex.ru/maps>); *б* — роза ветров в месте установленных ловушек (по данным Meteoblue) [30]

Fig. 2. Location of the study (Prionezhsky district, Republic of Karelia): *a* — diagram of the placement of barrier-funnel traps in agroecosystems circles — place of release of *Ips typographus*, diamonds — placement of barrier-funnel traps («Yandex maps» <https://yandex.ru/maps>); *b* — wind rose in the place of installed traps (according to Meteoblue data) [30]

I. Отлов жуков в естественных биоценозах.

Имаго короледа-типографа отлавливали широко применяемыми барьерно-вороночными феромонными ловушками для мониторинга ксилофагов. Такие ловушки широко применяют для мониторинга ксилофагов, отлавливая большое число жуков [1, 28, 29]. Всего отловлено 782 особи.

II. Мечение жуков люминофором. На этом этапе окрашивали имаго короледа-типографа фотолюминисцентным порошком, используя пигмент зеленого и синего цвета с длительным послесвечением — «Люминофор ЛДП». Окрашивание жуков осуществляли не менее чем за 1 ч до выпуска.

Для проверки смертности типографа от воздействия красящего пигмента отловленных жуков (100 шт.) предварительно окрасили порошком люминофором и перенесли в садки с корой ели и увлажненной фильтровальной бумагой, наблюдая за ними в течение 4 сут. при температуре 18...20 °С. Окрашивание имаго проводили в емкостях объемом 0,4 дм³, добавляя 0,5 г красящего порошка, перемешивали с помощью кисточки для глубокого проникновения мелких гранул порошка в складки между сегментами тела и под элитры.

III. Размещение ловушек для повторного отлова и выпуск окрашенных имаго. Этот этап проводили в агроценозах на площади около 20 га в 5 км от хвойного леса для снижения воздействия вываленных и усыхающих деревьев, которые привлекают ксилофагов и могут повлиять на

результат исследования. Для ограничения проникновения меченных короледа в лесные ценозы в месте исследования географическим барьером служила равнинная р. Шуя (рис. 2).

При изучении разлета короледа-типографа ловушки размещали в северо-западном, северо-восточном, юго-западном и юго-восточном направлениях по 6 шт. с интервалом 0,2 км на протяжении 1,2 км от места выпуска. Всего было установлено 24 ловушки (см. рис. 2) с учетом розы ветров, где преобладал ветер юго-западного направления [29]. Место выпуска короледа-типографа расположено на расстоянии 1,2 км от берега р. Шуя с северо-западной стороны и 1,4 км с северо-восточной. На лугах ловушки размещали на высоте 1,5...2 м от поверхности почвы на одиночных лиственных деревьях или сооружали специальные треноги.

Для успешного взлета насекомых применяли специальные возвышенности с горизонтальными и вертикальными поверхностями [24]. Для эксперимента была смонтирована трехуровневая деревянная подставка размером 20×20×15 см (рис. 3). Такая конструкция позволяет равномерно распределить жуков на поверхности и делает беспрепятственным их дальнейший взлет, что важно для оценки количества взлетевших насекомых.

IV. Отлов и подсчет меченых насекомых. Отловленных в ловушки окрашенных жуков короледа-типографа просматривали под бинокля-

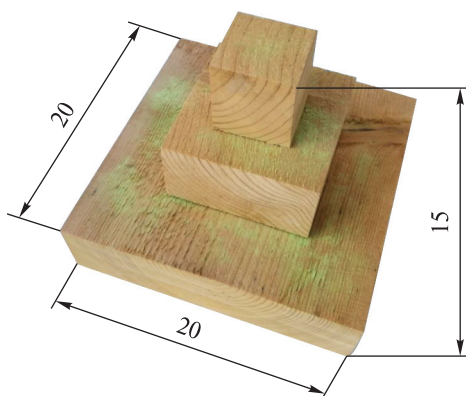


Рис. 3. Трехуровневая деревянная подставка для взлета *Ips typographus*

Fig. 3. Three-tier wooden take-off stand *Ips typographus*

Т а б л и ц а 1

Количество окрашенных и повторно отловленных в феромонные ловушки имаго *Ips typographus*

Number of *Ips typographus* adults painted and recaptured in pheromone traps

Выпуск (период)	Окрашено, шт.	Повторные отловы	
		количество, шт.	доля, %
Первый (июнь)	387	35	9
Второй (июль)	395	91	23
Всего	782	126	16

ром «Carl Zeiss Stemi 305» с УФ-свечением для корректного обнаружения на поверхности имаго следов красящего вещества люминофора. Учет материала из ловушек проводили с интервалом в 2 сут.

Результаты и обсуждение

В течение первого и второго выпусков было окрашено 782 особи короеда-типографа (табл. 1). Более 80 % жуков взлетает с трехуровневой деревянной подставки в течение 1...1,5 ч. Всего за два периода исследования повторно отловлено 126 особей, что составляет 16 % всех меченых жуков.

Исследователи Н. Мерисс, С. Поусон [24] и Дж. Хинце, Р. Джон [31] повторно отлавливали от 6 до 15 % меченых жуков. Используемый метод исследования с окрашиванием люминофором и повторным отловом позволяет установить направление и дальность разлета короеда-типографа. Следует отметить, что для анализа результатов необходимо большое количество жизнеспособных особей, и зачастую лишь немногие из них отлавливаются повторно, так как исследования с живым материалом в естественной среде не всегда являются предсказуемыми [25].

У вторично отловленных особей порошок оставался на теле жука в количестве не менее 10 %, особенно он накапливался в складках тергита брюшного отдела. В большинстве случаев порошок отсутствовал на лапках и усиках жука. Особи, отловленные в начале эксперимента, имели хорошо окрашенную порошок поверхность тела, в то время как у пойманных в конце исследования красящий пигмент просматривался только под элитрами. Интенсивность окраски зависела от дня отлова, однако красящий пигмент отчетливо выявлялся на всех повторно отловленных жуках. В лабораторных экспериментах по изучению выживаемости установлено, что лишь 8 % (8 особей из 100) были обездвижены и не подавали признаков жизни, что свидетельствует о незначительном воздействии люминофора на короеда-типографа.

В первом и втором выпусках количество отловленных жуков отличалось, что, вероятно, связано с воздействием как климатических факторов, так и возрастной структуры популяции. Климатические факторы, такие как температура и влажность окружающей среды, существенно влияют на летную активность короедов. Во втором выпуске количество повторно отловленных имаго было выше в связи с благоприятными абиотическими условиями, что способствовало интенсивному лету типографа. Многие виды короедов вынуждены начинать полет в небольшом диапазоне оптимальных температур, за его пределами не происходит успешное расселение [31]. Высокая влажность отрицательно влияет на активность *I. typographus*. Например, при повышенной относительной влажности атмосферного воздуха (71 %) численность жуков в полете в 2 раза меньше, чем при более низкой (49 %) [25].

На количество повторно отловленных особей в обоих выпусках не исключено и влияние возрастной структуры популяции. Высокая доля сбора короеда-типографа в июле для второго выпуска, возможно, связана с использованием для этого эксперимента молодых особей, которые более активны для расселения. В Карелии летный период короеда-типографа наблюдается с мая по сентябрь, жуки имеют одну генерацию с одним сестринским поколением и пиком численности в июле [1]. Для многих насекомых отмечено, что молодые особи более активны для расселения, чем родительское поколение и такое поведение способствует дифференциальному распределению и эволюционно стабильной стратегии расселения внутри популяций, что уменьшает плотность заселения деревьев и увеличивает площадь колонизации [32–34].

В вывешенных ловушках по всем исследуемым четырем направлениям было зафиксировано

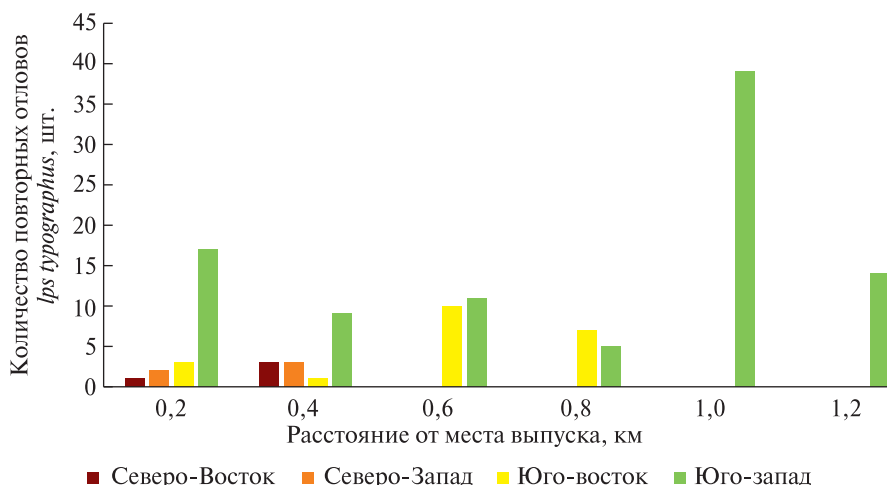


Рис. 4. Данные по повторному отлову окрашенных имаго Ips typographus в феромонные ловушки

Fig. 4. Data on recapture of colored adults of Ips typographus in pheromone traps

различное количество меченых жуков. Отмечено, что в южном направлении отловлено больше особей, чем в северном (рис. 4). В районе исследования преобладал юго-западный ветер [30], что, вероятно, способствовало распространению аттрактивного вещества и послужило фактором для полета короледа-типографа в этом направлении.

В результате исследований установили, что дальность разлета *I. typographus* в юго-западном направлении составила 1,2 км, в северо-западном — лишь несколько жуков преодолели расстояние 0,4 км (см. рис. 4). Однако не исключено, что часть особей, пойманных в ловушку, все еще могут быть способны к дальнейшему расселению. В исследованиях Н. Мерисс, С. Поусон [24] и Дж. Хинце, Р. Джон [31] отмечено, что многие короеды самостоятельно преодолевают расстояние около 1 км.

В течение эксперимента короеды-типографы зафиксированы в феромонных ловушках во всех направлениях, однако в юго-западном направлении количество отловленных особей всегда было больше, чем в остальных. Такой характер лета короедов можно объяснить преобладанием умеренного юго-западного ветра (см. рис. 2), который переносил аттрактивные вещества из ловушек этого направления к месту выпуска насекомых. Короеды, получая такой семиохимический сигнал, начинали самостоятельное движение против ветра по направлению к приманке. Например, в экспериментах С. Салом и соавторы [26] установили, что древесинник хвойный полосатый (*Trypodendron lineatum* Olivier) летит против ветра в направлении к аттрактанту.

Все полученные значения по отлову короледа-типографа имеют значимые отличия (табл. 2). Значения показателей критерия Пирсона (χ^2) и уровня значимости (p) при числе степеней свободы

Т а б л и ц а 2

Количество вторично отловленных особей Ips typographus в исследуемых направлениях
Number of recaptured individuals of Ips typographus in the studied directions

Расстояние, км	Направление разлета		Критерий Пирсона χ^2	Уровень значимости p
	северо-запад	юго-запад		
0,2	2	14	16,0	0,00148
0,4	3	9	12,0	0,05139
0,6	0	11	11,0	0,00049
0,8	0	5	5,0	0,01464
1,0	0	39	39,0	<0,05
1,2	0	14	14,0	<0,05

$df = 1$ доказывают, что в юго-западном направлении особи короледа-типографа в феромонные ловушки отлавливались чаще, чем в северо-западном.

Проведенный нами опыт показал самостоятельный лет *I. typographus* на расстояние 1,2 км. Для короедов, как и многих мелких насекомых, характерен пассивный полет, где ветер может определять направление и переносить имаго на большие расстояния. Воздействие ветра позволяет минимизировать расходование короедом энергетических затрат и способствует расселению жуков на большие расстояния [35]. Такой вариант распределения установлен для горного соснового лубоеда *Dendroctonus ponderosae*, который, как и короед-типограф, расселяется с подветренного направления [36, 37].

На полет насекомых большое влияние оказывают абиотические факторы окружающей среды, которые действуют совместно, определяя как начало, так и продолжительность лёта. Летные исследования короедов-типографов показывают,

что большое значение в их распространении имеют температура воздуха и направление ветра. Температура воздуха определяет начало и время лёта. Расселение жуков на конкретной территории зависит от установившегося температурного режима. Ветер определяет, как направление, так и расстояние полета.

Проведение исследования в условиях агроценоза позволило отловить большее количество меченых особей, поскольку количество (плотность) деревьев в древостое влияет на полет короедов. В экспериментах также установлено, что отлов различных короедов в ловушках выше в прореженных насаждениях, чем в плотных древостоях [38].

Выводы

Исследования разлета короедов на примере *I. typographus* показали возможность применения порошка люминофора в качестве красящего пигмента для маркировки имаго короеда-типографа, который в течение нескольких дней сохранялся на поверхности тела жука в складках после повторного отлова в ловушки. Количество повторно отловленных жуков *I. typographus* составило 16 % от всех меченых порошком люминофора особей. Отмечена дальность разлета короеда-типографа на расстояние 1,2 км. Разлет короеда-типографа происходил против направления преобладающего юго-западного ветра. В этом направлении на расстоянии 1 км от места выпуска зарегистрировано наибольшее число особей.

Результаты работы могут найти отражение в совершенствовании методических рекомендаций по ликвидации очагов короеда-типографа при проведении фитосанитарных мероприятий.

Список литературы

- [1] Лябзина С.Н., Чалкин А.А. Феромониторинг короеда-типографа в Карелии // Защита и карантин растений, 2023. № 6. С. 27–29. DOI: 10.47528/1026-8634_2023_6_27
- [2] Гниненко Ю.И., Хегай И.В., Чилахсаева Е.А. Технология комплексной защиты ельников от короеда-типографа с применением энтомофагов и феромонов. Пушкино: Изд-во ВНИИЛМ, 2021. 48 с.
- [3] Stereńczak K., Mielcarek M., Kamińska A., Kraszewski B., Piasecka Z., Miścicki S., Heurich, M. Influence of selected habitat and stand factors on bark beetle *Ips typographus* (L.) outbreak in the Białowieża Forest // Forest Ecology and Management, 2020, no. 459, e117826.
- [4] Пирцхалава-Карпова Н.Р., Карпов А.А., Грищенко М.Ю. Моделирование реакции короеда на изменение климата // Биомониторинг в Арктике / под ред. Т.Ю. Сорокиной. Архангельск: Изд-во САФУ, 2020. С. 40–44.
- [5] Леонтьев А.С., Мариничева Т.В., Абрамова Н.И., Мариничев Е.А. Особенности формирования очагов короеда-типографа в северо-западных районах Нижегородской области // J. of Agriculture and Environment, 2024. № 1 (41), no. 11.
- [6] Raffa K.F., Grégoire J.C., Lindgren B.S. Natural history and ecology of bark beetles. In Bark Beetles: Biology and Ecology of Native and Invasive Species / Edited by F.E. Vega and R.W. Hofstetter. Academic Press, Elsevier, 2015, pp. 1–40. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417156-5.00001-0>
- [7] Evenden M.L., Whitehouse C.M., Sykes J. Factors influencing flight capacity of the mountain pine beetle (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) // Environ. Entomol., 2014, no. 43(1), pp. 187–196. doi.org/10.1603/EN13244
- [8] Demidko D.A., Demidko N.N., Mikhaylov P.V., Sultson S.M. Biological strategies of invasive bark beetles and borers species // Insects, 2021, no. 12(4), p. 367. DOI: 10.3390/insects12040367
- [9] Nemeč V., Zúmr V., Starý P. Studies on the nutritional state and the response to aggregation pheromones in the bark beetle, *Ips typographus* (L.) (Col., Scolytidae) // J. of Applied Entomology, 1993, no. 116(1–5), pp. 358–363. DOI:10.1111/j.1439-0418.1993.tb01208.x
- [10] Duelli P., Zahradnik P., Knizek M., Kalinova B. Migration in spruce bark beetles (*Ips typographus* L.) and the efficiency of pheromone traps // J. of Applied Entomology, 1997, no 121, pp. 297–303. DOI: 10.1111/j.1439-0418.1997.tb01409.x
- [11] Wijerathna A., Evenden M. Effect of environmental conditions on flight capacity in Mountain Pine Beetle (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) // J. of Insect Behavior, 2020, no. 33(5–6), pp. 201–215. DOI: 10.1007/s10905-020-09760-y
- [12] Jactel H., Gaillard J.A preliminary study of the dispersal potential of *Ips sexdentatus* (Boern) (Col., Scolytidae) with an automatically recording flight mill // J. of Applied Entomology, 1991, no. 112, pp. 138–145. doi.org/10.1111/j.1439-0418.1991.tb01039.x
- [13] Forsse E., Solbreck C.H. Migration in the bark beetle *Ips typographus* L.: Duration, timing and height of flight // Zeitschrift für Angewandte Entomologie, 2009, no. 100, pp. 47–57. DOI: 10.1111/j.1439-0418.1985.tb02756.x
- [14] Shegelski V.A., Evenden M.L., Sperling F.A.H. Morphological variation associated with dispersal capacity in a tree-killing bark beetle *Dendroctonus ponderosae* Hopkins // Agricultural and Forest Entomology, 2019, no. 21(1), pp. 79–87. <https://doi.org/10.1111/afe.12305>
- [15] Lindman L., Ranius T., Schroeder M. Regional climate affects habitat preferences and thermal sums required for development of the Eurasian spruce bark beetle, *Ips typographus* // Forest Ecology and Management, 2023, no. 544, p. 121216. DOI: 10.1016/j.foreco.2023.121216
- [16] Linton D.A., Safranyik L., McMullen L.H., Bets R.A. Field techniques for rearing and marking mountain pine beetles for use in dispersal studies // J. of the Entomological Society of British Columbia, 1987, no. 84, pp. 53–56.
- [17] Zúmr V. Dispersal of the spruce bark beetle *Ips typographus* (L.) (Col., Scolytidae) in spruce woods // J. of Applied Entomology, 1992, no. 114, pp. 348–352. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.1992.tb01138.x>
- [18] Franklin A.J., Grégoire J.C. Flight behaviour of *Ips typographus* L. (Col., Scolytidae) in an environment without pheromones // Annals of Forest Science, 1999, no. 56, pp. 591–598. doi.org/10.1051/forest:19990706
- [19] Shegelski V.A., Campbell E.O., Thompson K.M., Whitehouse C.M., Sperling F.A. Source and spread dynamics of mountain pine beetle in central Alberta, Canada // The Canadian Entomologist, 2021, no. 153(3), pp. 314–326. DOI: 10.4039/tce.2020.83
- [20] Falfan V., Petrovič F., Gábor M., Šagát V., Hruška M. Mountain landscape dynamics after large wind and bark

- beetle disasters and subsequent logging — Case studies from the Carpathians // *Remote Sensing*, 2021, no. 13(19), p. 3873. doi.org/10.3390/rs13193873
- [21] Srivastava V., Carroll A.L. Dynamic distribution modeling using a native invasive species, the mountain pine beetle // *Ecological Modelling*, 2023, no. 482, p. 110409. doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110409
- [22] Reid T.G., Reid M.L. Fluorescent powder marking reduces condition but not survivorship in adult mountain pine beetles // *Can. Entomol.*, 2008, no. 140(5), pp. 582–588. doi:10.4039/n08-035
- [23] Doležal P., Okrouhlík J., Davidková M. Fine fluorescent powder marking study of dispersal in the spruce bark beetle, *Ips typographus* (Coleoptera: Scolytidae) // *European J. of Entomology*, 2016, no. 113, pp. 1–8. DOI: 10.14411/eje.2016.00
- [24] Meurisse N., Pawson S. Quantifying dispersal of a non-aggressive saprophytic bark beetle // *PLoS one*, 2017, no. 12(4), e0174111. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174111
- [25] Franklin A.J., Grégoire J.C. Flight behaviour of *Ips typographus* L. (Col., Scolytidae) in an environment without pheromones // *Annals of Forest Science*, 1999, no. 56, pp. 591–598. doi.org/10.1051/forest:19990706
- [26] Salom S.M., McLean J.A. Flight behavior of scolytid beetle in response to semiochemicals at different wind speeds // *J. of Chemical Ecology*, 1991, no. 17(3), pp. 647–661.
- [27] Пирцхалава-Карпова Н.Р., Карпов А.А., Грищенко М.Ю., Козловский Е.Е. Исследование участков леса, подверженных влиянию кородеда-типографа (*Ips typographus*) в заповеднике «Курильский» (о. Кунашир) // *Лесотехнический журнал*, 2020. Т. 10. № 1 (37). С. 50–59. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.1/5
- [28] Усень В.В., Шатравко В.Г., Блинова Н.С., Помаз Г.М. Атрактивность феромонных препаратов для мониторинга численности стволовых вредителей в сосновых насаждениях Беларуси // *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия биологических наук*, 2023. Т. 68. № 1. С. 7–14. https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-1-7-14
- [29] Arbuzova E.N., Kulinich O.A., Chalkin A.A., Weis V., Magomedov R.K., Mordkovich Ya.B., Kozyreva N.I., Ryss A.Yu. Efficacy of ethanedinitrile fumigant application against the pinewood nematode, *bursaphelenchus xylophilus* (Nematoda: aphelenchidae), in pine logs // *Russian J. of Nematology*, 2020, t. 28, no. 1, pp. 71–78.
- [30] Метеоблюе. Архив погоды, роза ветра п. Шуя, Республика Карелия, Россия. URL:https://www.meteoblue.com/ru/historyclimate (дата обращения 01.11.2024).
- [31] Hinze J., John R. Effects of heat on the dispersal performance of *Ips typographus* // *J. of Applied Entomology*, 2020, no. 144, pp. 144–151. https://doi.org/10.1111/jen.12718
- [32] Исаев А.С., Пальникова Е.Н., Суховольский В.Г., Тарасова О.В. Динамика численности лесных насекомых-филлофагов: модели и прогнозы. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2015. 262 с.
- [33] Takagi E. Colonization success of a tree-killing bark beetle: Geographic variation and mismatch with host preference // *Ecology and Evolution*, 2023, no. 13(7), p. e10274. DOI: 10.1002/ece3.10274
- [34] Howe M., Mason C.J., Gratton C., Keefover-Ring K., Wallin K., Yanchuk A., Zhu J., Raffa K.F. Relationships between conifer constitutive and inducible defenses against bark beetles change across levels of biological and ecological scale // *Oikos*, 2020, no. 129(7), pp. 1093–1107. DOI: 10.1111/oik.07242
- [35] Jackson P.L., Straussfogel D., Lindgren B.S., Mitchell S., Murphy B. Radar observation and aerial capture of mountain pine beetle, *Dendroctonus ponderosae* Hopk. (Coleoptera: Scolytidae), in flight above the forest canopy // *Canadian J. of Forest Research*, 2008, no. 38(8), pp. 2313–2327. https://doi.org/10.1139/X08-066
- [36] Jaime L., Batllori E., Lloret F. Bark beetle outbreaks in coniferous forests: a review of climate change effects // *European J. of Forest Research*, 2024, no. 143, pp. 1–17. DOI: 10.1007/s10342-023-01623-3
- [37] Fettig C.J., Audley J.P., Homicz C.S., Progar R.A. Applied Chemical Ecology of the Western Pine Beetle, an Important Pest of Ponderosa Pine in Western North America // *Forests* – 2023, no. 14(4), p. 757. DOI: 10.3390/f14040757
- [38] Safranyik L., Shore T.L., Linton D.A. Measuring trap efficiency for bark beetles (Col., Scolytidae) // *J. of Applied Entomology*, 2004, no. 128(5), pp 337–341. DOI: 10.1111/j.1439-0418.2004.00851.x

Сведения об авторах

Чалкин Андрей Андреевич [✉] — науч. сотр. отдела лесного карантина, ФГБУ «Всероссийский центр карантина растений» (ФГБУ «ВНИИКР»), chalkin10@ya.ru

Лябзина Светлана Николаевна — д-р биол. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»; науч. сотр. Североморского филиала ФГБУ «Всероссийский центр карантина растений» (ФГБУ «ВНИИКР»), slyabzina@petrsu.ru

Кулинич Олег Андреевич — д-р биол. наук, гл. науч. сотр., начальник отдела лесного карантина, ФГБУ «Всероссийский центр карантина растений» (ФГБУ «ВНИИКР»); Центр паразитологии Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова Российской академии наук (ИПЭЭ РАН), okulinich@mail.ru

Поступила в редакцию 18.03.2024.

Одобрено после рецензирования 15.07.2024.

Принята к публикации 22.08.2024.

RESEARCH OF *IPS TYPOGRAPHUS* (LINNAEUS, 1758) FLIGHT BEHAVIOR USING LUMINESCENT POWDER

A.A. Chalkin¹✉, S.N. Lyabzina^{2,3}, O.A. Kulinich^{1,4}

¹All-Russian Center for Plant Quarantine, 32, Pogradichnaya st., 140150, Bykovo village, Ramenskoye, Moscow reg., Russia

²Sevromorsk branch of the Federal State Budgetary Institution «All-Russian Center for Plant Quarantine», 7, Lososinskaya naberezhnaya, 185003, Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia

³Petrozavodsk State University, 33, Lenina av., 185910, Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia

⁴Center for Parasitology, Institute of Ecology and Evolution. A.N. Severtsov Russian Academy of Sciences, 33, Leninskiy av., 119071, Moscow, Russia

chalkin10@ya.ru

The study results of the range and direction of the bark beetle (*Ips typographus* L.) flight using a method of tagging and recapturing of adults in an open biocenosis in the Republic of Karelia are presented. Studies carried out in two repetitions showed that a finely dispersed powder of phosphor of bright green or blue shades with a long afterglow is suitable for mass tagging of bark beetles; its particles remain on the body of the bark beetle for several days and are clearly visible under UV light, and the tagged individuals retain their activity. It was noted that the powder is evenly dispersed over all parts of the insect body, concentrating under the wing sheath and on the setae. The data analysis shows that in the experiment 16 % (126 adults out of 782) of tagged bark beetle adults were recaptured in pheromone traps of barrier-folder type with species-specific aggregation attractant, which were placed in north-western, south-western, north-eastern and south-eastern directions from the point of bark beetle release, 6 pieces per side at an interval of 0,2 km. It was found that during recapture, the maximum number of beetles (60 %) was captured in the southwestern direction at a distance of 1 km from the release point. It was found that the dispersal of bark beetle-typograph, taking into account the wind rose, occurred against the direction of the prevailing wind carrying attractants.

Keywords: *Ips typographus*, bark beetle, pheromone traps, phosphor, marking and recapture

Suggested citation: Chalkin A.A., Lyabzina S.N., Kulinich O.A. *Izuchenie napravleniya razleta Ips typographus (Linnaeus, 1758) s pomoshch'yu lyuminestsentnogo poroshka* [Research of *Ips typographus* (Linnaeus, 1758) flight behavior using luminescent powder]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 5, pp. 118–128. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-118-128

References

- [1] Lyabzina S.N., Chalkin A.A. *Feromonitoring koroeda-tipografa v Karelii* [Pheromonitoring of the bark beetle in Karelia]. *Zashchita i karantin rasteniy* [Plant Protection and Quarantine], 2023, no. 6, pp. 27–29. DOI: 10.47528/1026-8634_2023_6_27
- [2] Gninenko Yu.I., Khegay I.V., Chilakhsaeva E.A. *Tekhnologiya kompleksnoy zashchity el'nikov ot koroeda-tipografa s primeneniem entomofagov i feromonov* [Technology of integrated protection of spruce forests from the bark beetle using entomophages and pheromones]. Pushkino: VNIILM, 2021, 48 p.
- [3] Stereńczak K., Mielcarek M., Kamińska A., Kraszewski B., Piasecka Ż., Miścicki S., Heurich, M. Influence of selected habitat and stand factors on bark beetle *Ips typographus* (L.) outbreak in the Białowieża Forest. *Forest Ecology and Management*, 2020, no. 459, e117826.
- [4] Pirtskhalava-Karpova N.R., Karpov A.A., Grishchenko M.Yu. *Modelirovanie reaktsii koroeda na izmenenie klimata* [Modeling of the bark beetle response to climate change]. *Biomonitoring v Arktike* [Biomonitoring in the Arctic]. Ed. by T.Yu. Sorokina. Arkhangelsk: NArFU, 2020, pp. 40–44.
- [5] Leontenkov A.S., Marinicheva T.V., Abramova N.I., Marinichev E.A. *Osobennosti formirovaniya ochagov koroeda-tipografa v severo-zapadnykh rayonakh Nizhegorodskoy oblasti* [Features of the formation of bark beetle foci in the northwestern regions of the Nizhny Novgorod region]. *J. of Agriculture and Environment*, 2024, no. 1 (41), no. 11.
- [6] Raffa K.F., Grégoire J.C., Lindgren B.S. *Natural history and ecology of bark beetles*. In *Bark Beetles: Biology and Ecology of Native and Invasive Species* / Ed. F.E. Vega and R.W. Hofstetter. Academic Press, Elsevier, 2015, pp. 1–40. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417156-5.00001-0>
- [7] Evenden M.L., Whitehouse C.M., Sykes J. Factors influencing flight capacity of the mountain pine beetle (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae). *Environ. Entomol.*, 2014, no. 43(1), pp. 187–196. doi.org/10.1603/EN13244
- [8] Demidko D.A., Demidko N.N., Mikhaylov P.V., Sultson S.M. Biological strategies of invasive bark beetles and borers species. *Insects*, 2021, no. 12(4), p. 367. DOI: 10.3390/insects12040367
- [9] Nemeč V., Zumr V., Starý P. Studies on the nutritional state and the response to aggregation pheromones in the bark beetle, *Ips typographus* (L.) (Col., Scolytidae). *J. of Applied Entomology*, 1993, no. 116(1–5), pp. 358–363. DOI:10.1111/j.1439-0418.1993.tb01208.x
- [10] Duelli P., Zahradnik P., Knizek M., Kalinova B. Migration in spruce bark beetles (*Ips typographus* L.) and the efficiency of pheromone traps. *J. of Applied Entomology*, 1997, no 121, pp. 297–303. DOI: 10.1111/j.1439-0418.1997.tb01409.x
- [11] Wijerathna A., Evenden M. Effect of environmental conditions on flight capacity in Mountain Pine Beetle (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae). *J. of Insect Behavior*, 2020, no. 33(5–6), pp. 201–215. DOI: 10.1007/s10905-020-09760-y
- [12] Jactel H., Gaillard J.A. preliminary study of the dispersal potential of *Ips sexdentatus* (Boern) (Col., Scolytidae) with an automatically recording flight mill. *J. of Applied Entomology*, 1991, no. 112, pp. 138–145. doi.org/10.1111/j.1439-0418.1991.tb01039.x

- [13] Forsse E., Solbreck C.H. Migration in the bark beetle *Ips typographus* L.: Duration, timing and height of flight. *Zeitschrift für Angewandte Entomologie*, 2009, no. 100, pp. 47–57. DOI: 10.1111/j.1439-0418.1985.tb02756.x
- [14] Shegelski V.A., Evenden M.L., Sperling F.A.H. Morphological variation associated with dispersal capacity in a tree-killing bark beetle *Dendroctonus ponderosae* Hopkins. *Agricultural and Forest Entomology*, 2019, no. 21(1), pp. 79–87. <https://doi.org/10.1111/afe.12305>
- [15] Lindman L., Ranius T., Schroeder M. Regional climate affects habitat preferences and thermal sums required for development of the Eurasian spruce bark beetle, *Ips typographus*. *Forest Ecology and Management*, 2023. no. 544, p. 121216. DOI: 10.1016/j.foreco.2023.121216
- [16] Linton D.A., Safranyik L., McMullen L.H., Bets R.A. Field techniques for rearing and marking mountain pine beetles for use in dispersal studies. *J. of the Entomological Society of British Columbia*, 1987, no. 84, pp. 53–56.
- [17] Zumr V. Dispersal of the spruce bark beetle *Ips typographus* (L.) (Col., Scolytidae) in spruce woods. *J. of Applied Entomology*, 1992, no. 114, pp. 348–352. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.1992.tb01138.x>
- [18] Franklin A.J., Grégoire J.C. Flight behaviour of *Ips typographus* L. (Col., Scolytidae) in an environment without pheromones. *Annals of Forest Science*, 1999, no. 56, pp. 591–598. doi.org/10.1051/forest:19990706
- [19] Shegelski V.A., Campbell E.O., Thompson K.M., Whitehouse C.M., Sperling F.A. Source and spread dynamics of mountain pine beetle in central Alberta, Canada. *The Canadian Entomologist*, 2021, no. 153(3), pp. 314–326. DOI: 10.4039/tce.2020.83
- [20] Fal'tan V., Petrovič F., Gábor M., Šagát V., Hruška M. Mountain landscape dynamics after large wind and bark beetle disasters and subsequent logging — Case studies from the Carpathians. *Remote Sensing*, 2021, no. 13(19), p. 3873. doi.org/10.3390/rs13193873
- [21] Srivastava V., Carroll A.L. Dynamic distribution modelling using a native invasive species, the mountain pine beetle. *Ecological Modelling*, 2023, no. 482, p. 110409. doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110409
- [22] Reid T.G., Reid M.L. Fluorescent powder marking reduces condition but not survivorship in adult mountain pine beetles. *Can. Entomol.*, 2008, no. 140(5), pp. 582–588. [doi:10.4039/n08-035](https://doi.org/10.4039/n08-035)
- [23] Doležal P., Okrouhlik J., Davidková M. Fine fluorescent powder marking study of dispersal in the spruce bark beetle, *Ips typographus* (Coleoptera: Scolytidae). *European J. of Entomology*, 2016, no. 113, pp. 1–8. DOI: 10.14411/eje.2016.00
- [24] Meurisse N., Pawson S. Quantifying dispersal of a non-aggressive saprophytic bark beetle. *PloS one*, 2017, no. 12(4), e0174111 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174111>
- [25] Franklin A.J., Grégoire J.C. Flight behaviour of *Ips typographus* L. (Col., Scolytidae) in an environment without pheromones. *Annals of Forest Science*, 1999, no. 56, pp. 591–598. doi.org/10.1051/forest:19990706
- [26] Salom S.M., McLean J.A. Flight behavior of scolytid beetle in response to semiochemicals at different wind speeds. *J. of Chemical Ecology*, 1991, no. 17(3), pp. 647–661.
- [27] Pirtskhalava-Karpova N.R., Karpov A.A., Grishchenko M.Yu., Kozlovskiy E.E. *Issledovanie uchastkov lesa, podverzhennykh vliyaniyu koroeda-tipografa (Ips typographus) v zapovednike «Kuril'skiy» (o. Kunashir)* [Study of forest areas affected by the bark beetle (*Ips typographus*) in the Kurilsky Nature Reserve (Kunashir Island)]. *Lesotekhnicheskij zhurnal [Forest Engineering Journal]*, 2020, v. 10, no. 1 (37), pp. 50–59. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.1/5
- [28] Usenya V.V., Shatravko V.G., Blinova N.S., Pomaz G.M. *Attraktivnost' feromonnykh preparatov dlya monitoringa chislennosti stvolovyykh vreditel'ey v sosnovyykh nasazhdeniyakh Belarusi* [Attractiveness of pheromone preparations for monitoring the number of stem pests in pine plantations of Belarus]. *Izvestiya Natsional'noy akademii nauk Belarusi. Seriya biologicheskikh nauk [Bulletin of the National Academy of Sciences of Belarus. Series of Biological Sciences]*, 2023, v. 68, no. 1, pp. 7–14. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-1-7-14>
- [29] Arbuzova E.N., Kulinich O.A., Chalkin A.A., Weis V., Magomedov R.K., Mordkovich Ya.B., Kozyreva N.I., Ryss A.Yu. Efficacy of ethanedinitrile fumigant application against the pinewood nematode, *bursaphelenchus xylophilus* (Nematoda: aphelenchidae), in pine logs. *Russian J. of Nematology*, 2020, t. 28, no. 1, pp. 71–78.
- [30] *Meteoblue. Arhiv pogody, roza vetra p. Shuya, Respublika Kareliya, Rossiya* [Meteoblue. Weather archive, wind rose p. Shuya, Republic of Karelia, Russia]. Available at: <https://www.meteoblue.com/ru/historyclimate> (accessed 01.11.2024).
- [31] Hinze J., John R. Effects of heat on the dispersal performance of *Ips typographus*. *J. of Applied Entomology*, 2020, no. 144, pp. 144–151. <https://doi.org/10.1111/jen.12718>
- [32] Isaev A.S., Pal'nikova E.N., Sukhovol'skiy V.G., Tarasova O.V. *Dinamika chislennosti lesnykh nasekomykh-fillofagov: modeli i prognozy* [Dynamics of the number of forest phyllophagous insects: models and forecasts]. Moscow: Partnership of scientific publications KMK, 2015, 262 p.
- [33] Takagi E. Colonization success of a tree-killing bark beetle: Geographic variation and mismatch with host preference. *Ecology and Evolution*, 2023, no. 13(7), p. e10274. DOI: 10.1002/ece3.10274
- [34] Howe M., Mason C.J., Gratton C., Keefover-Ring K., Wallin K., Yanchuk A., Zhu J., Raffa K.F. Relationships between conifer constitutive and inducible defenses against bark beetles change across levels of biological and ecological scale. *Oikos*, 2020, no. 129(7), pp. 1093–1107. DOI: 10.1111/oik.07242
- [35] Jackson P.L., Straussfogel D., Lindgren B.S., Mitchell S., Murphy B. Radar observation and aerial capture of mountain pine beetle, *Dendroctonus ponderosae* Hopk. (Coleoptera: Scolytidae), in flight above the forest canopy. *Canadian J. of Forest Research*, 2008, no. 38(8), pp. 2313–2327. <https://doi.org/10.1139/X08-066>
- [36] Jaime L., Batllori E., Lloret F. Bark beetle outbreaks in coniferous forests: a review of climate change effects. *European J. of Forest Research*, 2024, no. 143, pp. 1–17. DOI: 10.1007/s10342-023-01623-3
- [37] Fettig C.J., Audley J.P., Homicz C.S., Progar R.A. Applied Chemical Ecology of the Western Pine Beetle, an Important Pest of Ponderosa Pine in Western North America. *Forests* – 2023, no. 14(4), p. 757. DOI: 10.3390/f14040757
- [38] Safranyik L., Shore T.L., Linton D.A. Measuring trap efficiency for bark beetles (Col., Scolytidae). *J. of Applied Entomology*, 2004, no. 128(5), pp 337–341. DOI: 10.1111/j.1439-0418.2004.00851.x

Authors' information

Chalkin Andrei Andreevich✉ — Researcher of the Forest Quarantine Department of All-Russian Center for Plant Quarantine, chalkin10@ya.ru

Lyabzina Svetlana Nikolaevna — Dr. Sci. (Biology), Associate Professor, Petrozavodsk State University; Researcher, Sevromorsk Branch of the Federal State Budgetary Institution «All-Russian Center for Plant Quarantine», slyabzina@petsu.ru

Kulinich Oleg Andreevich — Dr. Sci. (Biology), Chief Scientific Associate, Head of Forest Quarantine Department, All-Russian Center for Plant Quarantine; Center for Parasitology, Institute of Ecology and Evolution. A.N. Severtsov Russian Academy of Sciences, okulinich@mail.ru

Received 18.03.2024.

Approved after review 15.07.2024.

Accepted for publication 22.08.2024.

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

СВЯЗЬ СОДЕРЖАНИЯ ПОЛЛЮТАНТОВ В ЛИСТЬЯХ БЕРЕЗЫ ПОВИСЛОЙ С ЖИЗНЕННЫМ СОСТОЯНИЕМ ДРЕВОСТОЯ НА ПРИМЕРЕ АО «КАРАБАШМЕДЬ»

В.Д. Горбунова✉, С.Л. Менщиков

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

botgarden.gor@yandex.ru

Проанализирована связь содержания поллютантов (серы и тяжелых металлов) в листьях березы повислой и жизненного состояния древостоя. Установлено, что наибольшее влияние на состояние древостоев в зоне действия АО «Карабашмедь» оказывают металлы — кадмий, свинец, медь и цинк. Выявлена положительная корреляционная связь параметров жизненного состояния (дефолиации, дехромации и категории состояния) и содержания этих микроэлементов (коэффициенты корреляции свыше 0,4...0,6). Зафиксировано повышение концентрации кадмия, свинца, цинка, меди и хрома в листьях березы на пробных площадях, ближайших к источнику загрязнения АО «Карабашмедь».

Ключевые слова: береза повислая, тяжелые металлы, аэротехногенные выбросы

Ссылка для цитирования: Горбунова В.Д., Менщиков С.Л. Связь содержания поллютантов в листьях березы повислой с жизненным состоянием древостоя на примере АО «Карабашмедь» // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 5. С. 129–137. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-129-137

Поиск показателей для диагностики жизненного состояния растительности в условиях воздействия внешних факторов, таких как техногенное загрязнение — актуальная задача при разработке методических аспектов оценки ущерба природным экосистемам, в результате техногенного воздействия одного из основных антропогенных факторов, которые обуславливают изменение природных сообществ. Город Карабаш Челябинской области рассматривается в качестве примера экологической катастрофы, связанной с промышленным производством. Зона воздействия АО «Карабашмедь» (КМК) распространяется на площадь более 35 км² [1]. Негативное влияние на природные сообщества территории в значительной мере происходит вследствие выбросов газов и пыли. Около 98 % всех выбросов составляет сернистый газ, который является источником кислотного загрязнения. Пыль, содержащаяся в выбросах, включает в себя разнообразные тяжелые металлы. В частности на 1 т черновой меди, выплавленной на предприятии, приходится 3,75 т выбросов в атмосферу [2].

Основными источниками загрязнения служат отходы медеплавильного производства (отходы обогащения медных и медно-цинковых руд, пиритные отложения в пойме р. Сак-Элга (бассейн Тобола), гранулированный шлак, литой шлак, шламы гидроокислов металлов). Согласно государственному докладу о состоянии окружающей среды в Челябинской области за 2020 г., всего выброшено в атмосферу загрязня-

ющих веществ в 2020 г. в Карабашском районе Челябинской области — 5305 т, из них, в том числе твердых — 0,019 т, газообразных и жидких — 5234 т, диоксида серы — 4116 т, оксида углерода — 382 т, оксида азота (в пересчете на NO₂) — 505 т, углеводородов (без летучих органических соединений) — 199 т, летучих органических соединений (ЛОС) — 27 т [3]. В список приоритетных веществ, характерных для выбросов АО «Карабашмедь», были включены 18 химических соединений: кадмия оксид, марганец, меди оксид, свинец и его соединения, хром 6+, азота диоксид, азота оксид, кислота серная, мышьяк, углерод (сажа), серы диоксид, сероводород, сероуглерод, углерода оксид, фтористые газообразные соединения, бенз(а)пирен, взвешенные вещества, керосин, в том числе шесть канцерогенов (хром 6+, углерод (сажа), бенз(а)пирен, свинец, кадмий, мышьяк) [4].

На территории воздействия КМК изучались почва [5, 6], древесная [7–10] и травянистая растительность [11, 12], было проанализировано содержание тяжелых металлов в разных органах березы повислой в южном направлении [1]. Береза занимает 124,8 тыс. га площади Челябинской области, занятой лесом, что составляет 52,8 % площади всех древесных видов [4]. *Betula pendula* имеет на листьях толстую кутикулу, в связи с этим вид характеризуется повышенной стойкостью к загрязняющим веществам, выбрасываемым в атмосферу промышленными предприятиями, в том числе к сернистому газу [13]. В свою очередь плодородие почвы оказывает влияние на

надземную фитомассу березы повислой в случае аэротехногенного загрязнения [14].

Несмотря на быструю адаптацию растений к химическим стрессам, они остаются весьма чувствительными к избытку того или иного микроэлемента. Адаптивная стратегия древесных видов к техногенному загрязнению зависит от адаптивного потенциала вида в целом к конкретному виду загрязнения [15]. Однако существуют растения, способные концентрировать отдельные тяжелые металлы без каких-либо видимых маркеров фитотоксичности. Видовая специфичность металлоаккумуляции может проявляться очень четко, так как для некоторых видов нормой становится концентрация тяжелых металлов, в сотни и тысячи раз превосходящая фоновую [16].

О механизмах устойчивости различных культур к повышенной концентрации тяжелых металлов пока мало сведений, установить величину фитотоксичности металла для растений достаточно трудно. Исследователи по-разному оценивают фитотоксичность одного и того же металла. Кроме того, токсичные концентрации тяжелых металлов в растительных тканях установить крайне сложно [17].

Оценка уровня аккумуляции тяжелых металлов в отдельных тканях и органах березы повислой показала, что в период активного роста наибольшее количество тяжелых металлов накапливается в ее листьях, брахибластах и коре [18]. Для древесных растений пороговые значения предельно допустимой концентрации (ПДК) были установлены только для некоторых элементов и древесных пород. Растения, тем не менее, обладают гомеостатическими механизмами, позволяющими поддерживать правильную концентрацию необходимых ионов металлов в различных клеточных компартментах и минимизировать ущерб от воздействия токсичных ионов металлов. [19]. В зависимости от вида и между особями одного вида, видимые симптомы фитотоксичности могут различаться, при этом наиболее распространены хлорозные или бурые пятна на листьях [17]. К широко известным воздействиям тяжелых металлов на растения относят угнетение процесса фотосинтеза, нарушение транспорта питательных веществ и минералов, изменение водного и гормонального обмена, замедление роста [20, 21].

Связь жизненного состояния древостоя с содержанием тяжелых металлов в листьях растений до сих пор остается не изученной.

Цель работы

Цель работы — изучение связи содержания поллютантов в листьях березы повислой (*Betula pendula*) с жизненным состоянием древостоя в пределах распространения загрязнения АО «Карабашмедь».

Объекты и методы исследования

Были исследованы природные древостои березы повислой (*Betula pendula* Roth), находящиеся под влиянием выбросов от КМК, расположенного в естественной депрессии Саймоновской долины. В данном районе преобладают юго-западные и западные ветры. Количество осадков составляет 400 мм в год, из них 90 мм выпадает в морозный (ноябрь – декабрь), а 300 мм — в безморозный период (апрель – октябрь) [22]. Почвенный профиль характеризуется каменистостью и незначительной мощностью [23]. Загрязнение водоемов в пределах рассматриваемой территории произошло в результате сброса отходов в р. Сак-Элга [24].

В зависимости от господствующих ветров и рельефа выбрано пять пробных площадей (ПП) с березовыми насаждениями различной степени загрязнения: С-1,5, СВ-5, СВ-15, СВ-20 и СВ-24 (буквами обозначены северное и северо-восточное направления ветра, числами показано расстояние от источника загрязнений до насаждения в километрах).

Для исследования выбрали один вид березы: береза повислая (*Betula pendula* Roth), поскольку он преобладает на всех участках. Модельные деревья были выбраны из верхнего яруса насаждений. Оценка состояния березовых насаждений проводилась методом биоиндикации с помощью показателей дефолиации (потеря хвои и листвы) и дехромации (изменение окраски) крон деревьев в качестве индикаторов [25]. Категория состояния деревьев (K_c) определялась в соответствии с рекомендациями Б.И. Ковалева [26]. Древостой характеризуется как здоровый при $K_c = 1,0 \dots 1,5$, ослабленный — при $K_c = 1,6 \dots 2,5$, сильно ослабленный — при $K_c = 2,6 \dots 3,5$, отмирающий — при $K_c = 3,6 \dots 4,6$ и отмерший — при $K_c = 4,6$ и выше.

Для изучения вариабельности химического состава листьев березы повислой и индивидуальной изменчивости было отобрано по 10 деревьев с каждой ПП в районе АО «Карабашмедь». Со всех деревьев взят образец листьев массой около 20 г, причем только с укороченных побегов, которые образуют основную часть полога у взрослых деревьев и имеют одинаковый возраст вследствие синхронного распускания листьев весной [27].

В листьях определяли содержание серы по методу ЦИНАО (1999) [28], тяжелых металлов — методом атомно-абсорбционной спектrophотометрии с помощью атомно-абсорбционного спектрофотометра novAA-300 (AnalyticJena, Германия).

Для интерпретации полученных результатов использовали шкалу, из работы [17], в которой приведены нормальные (или достаточные)

концентрации микроэлементов (мг/кг сухой массы): Cd — 0,05...0,2; Co — 0,02...1; Cr — 0,1...0,5; Cu — 5...30; Ni — 0,1...5; Pb — 5...10; Zn — 27...150, избыточные (или токсичные): Cd — 5...30; Co — 15...50; Cr — 5...30; Cu — 20...100; Ni — 10...100; Pb — 30...300; Zn — 100...400.

Полученный материал был проанализирован с использованием пакета программ Microsoft Excel 2007 и метода статистического анализа в системе STATISTICA V. 10 (StatSoft, Inc.). Для определения различий между пятью группами был использован однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с последующим определением с помощью критерия Фишера. Зависимость содержания элементов в растениях от жизненного состояния деревьев проверялась с помощью параметрического коэффициента и корреляции r Пирсона. Результаты статистического анализа были оценены по уровню значимости 5 %.

Результаты и обсуждение

В районе исследования была проведена оценка жизненного состояния березовых древостоев, в частности на разном расстоянии от источника загрязнения — АО «Карабашмедь» (рис. 1).

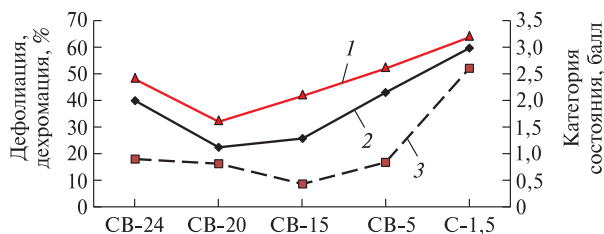


Рис. 1. Характеристика пробных площадей на разном удалении от АО «Карабашмедь»: 1 — категория состояния; 2 — средняя дефолиация, %; 3 — средняя дехромация, %

Fig. 1. Characteristics of sample areas at different distances from Karabashmed JSC: 1 — condition category; 2 — average defoliation, %; 3 — average dechromation, %

Березовые леса, находящиеся ближе к источнику загрязнения (С-1,5), имеют наибольшую степень повреждения. Уровень дефолиации, дехромации и категории состояния на С-1,5 в 1,5...2 раза выше, чем на более удаленных от АО «Карабашмедь» ПП. Пробные площади, находящиеся на расстоянии 15...24 км, характеризуются наилучшим состоянием по сравнению с другими. Древостои на СВ-24, СВ-20, СВ-15 ослабленные ($K_c = 2,4$, $K_c = 1,6$, $K_c = 2,1$ соответственно), на СВ-5 и С-1,5 — сильно ослабленные ($K_c = 2,6$, $K_c = 3,2$ соответственно). По этим данным можно сделать вывод о негативном воздействии КМК на березовые древостои, проявляющемся в увеличении дефолиации, дехромации и ухудшении категории состояния.

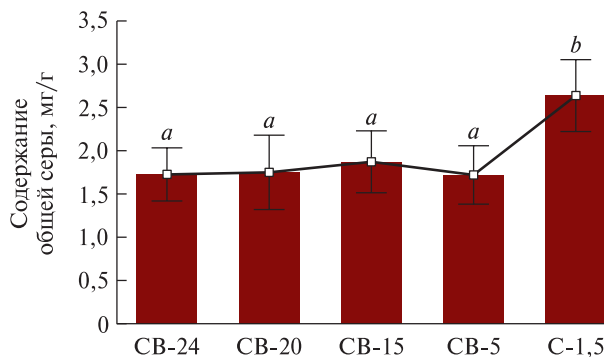


Рис. 2. Содержание серы в листьях березы повислой *B. pendula* на различном расстоянии от АО «Карабашмедь». Одинаковые буквы над столбцами обозначают отсутствие статистически значимых отличий между ПП, F -критерии Фишера при 5%-м уровне значимости, $n = 15$. Вертикальные линии на столбцах обозначают стандартное отклонение (SD), индивидуальную изменчивость по 15 деревьям

Fig. 2. Sulphur content in Silver birch leaves (*Betula pendula*) at different distances from Karabashmed JSC. Identical letters above the columns denote the absence of statistically significant differences between PPs, Fisher's F -criteria at 5% significance level, $n = 15$. Vertical lines on columns denote standard deviation (SD), individual variability of 15 trees

Теснота связи (коэффициенты корреляции Пирсона) между содержанием элементов и жизненным состоянием березового древостоя в градиенте загрязнения АО «Карабашмедь»

The relationship (Pearson correlation coefficients) between the elements content and the vital state of birch stands in the polluted area by Karabashmed JSC

Элементы	Дефолиация, %	Дехромация, %	Категория состояния, балл
Сера	0,18	0,30	0,21
Кадмий	0,59	0,46	0,58
Медь	0,62	0,59	0,59
Свинец	0,48	0,53	0,56
Цинк	0,54	0,41	0,49
Железо	0,44	0,23	0,34
Никель	0,40	0,04	0,38
Кобальт	0,019	0,00	0,05
Хром	0,22	-0,04	0,22

Примечание. Выделены статистически значимые коэффициенты корреляции ($p < 0,05$)

Установлено, что в листьях березы повислой содержание серы увеличивается на 35 % ($p < 0,05$) на ПП, ближайшей к источнику загрязнения, по сравнению с другими ПП (рис. 2).

Получена положительная корреляция содержания серы с дехромацией листы ($r = 0,30$, $p < 0,05$) (таблица), т. е. содержание серы увеличивается

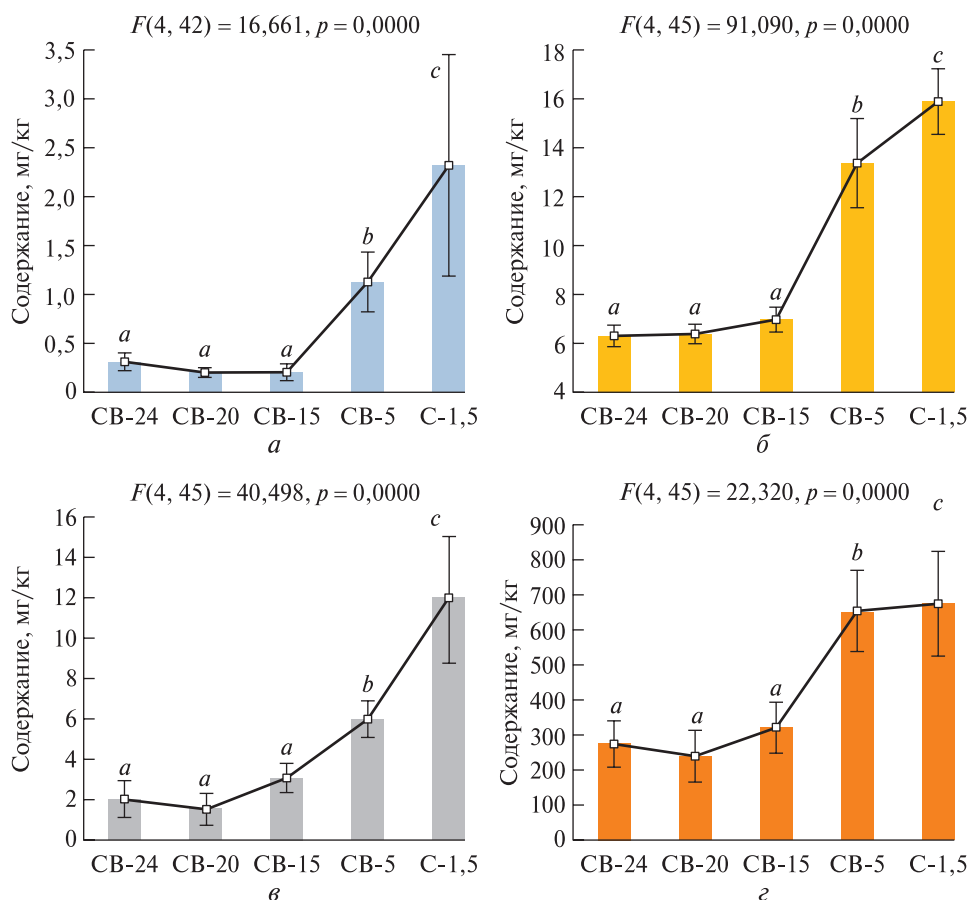


Рис. 3. Содержание кадмия (а), меди (б), свинца (в) и цинка (з) в листьях березы повислой *B. pendula* на различном расстоянии от АО «Карабашмедь». Одинаковые буквы над столбцами обозначают отсутствие статистически значимых отличий между ПП, *F*-критерии Фишера при 5%-м уровне значимости, $n = 15$. Вертикальные линии на столбцах обозначают стандартное отклонение (SD), индивидуальную изменчивость по 15 деревьям

Fig. 3. Content of cadmium (a), copper (b), lead (v) and zinc (z) in *B. pendula* leaves at different distances from Karabashmed JSC. Identical letters above the columns denote the absence of statistically significant differences between PPs, Fisher's *F*-criteria at 5% significance level, $n = 15$. Vertical lines on columns denote standard deviation (SD), individual variability across 15 trees

в листе поврежденных выбросами сернистого газа древостоях березы, что также визуально проявлялось в пожелтении листьев и, следовательно, увеличении дехромации. Сернистый ангидрид, подкисляя среду, повышает подвижность и биологическую активность ионов металлов, резко увеличивая их токсическое воздействие на биоту [28]. Поступление серы в ассимиляционный аппарат возможно как через атмосферу, так и из почвы, поскольку вблизи металлургического производства валовое содержание серы в почвах превышает ПДК в среднем в 2–8 раз [29].

Основными загрязнителями комбината наряду с диоксидом серы, являются также тяжелые металлы. Особенность токсического эффекта данных загрязнителей заключается в совместном действии, оказываемом на лесные экосистемы [30]. Береза характеризуется «нейтральной» адаптивной стратегией и средним адаптивным потен-

циалом [31]. Проведен анализ содержания тяжелых металлов в листьях березы повислой на разном удалении от АО «Карабашмедь» (рис. 3, см. рис. 2). В районе функционирования предприятия сформировалась техногенная среда с повышенным содержанием тяжелых металлов. По мере приближения к источнику загрязнения, увеличивается концентрация металлов в листьях березы. Повышена также концентрация кадмия, свинца, цинка, меди, хрома в листьях березы повислой ближайших к источнику загрязнения ПП. Тем не менее их концентрация не превышает токсичные значения, за исключением цинка и никеля — их содержание превышает токсичные концентрации на всех ПП.

Содержание цинка превышает токсичные значения (300...680 мг/кг) на всех ПП.

На расстоянии 15...24 км содержание цинка между ПП достоверно не изменяется и составляет около 300 мг/кг. На ПП, приближенных к источ-

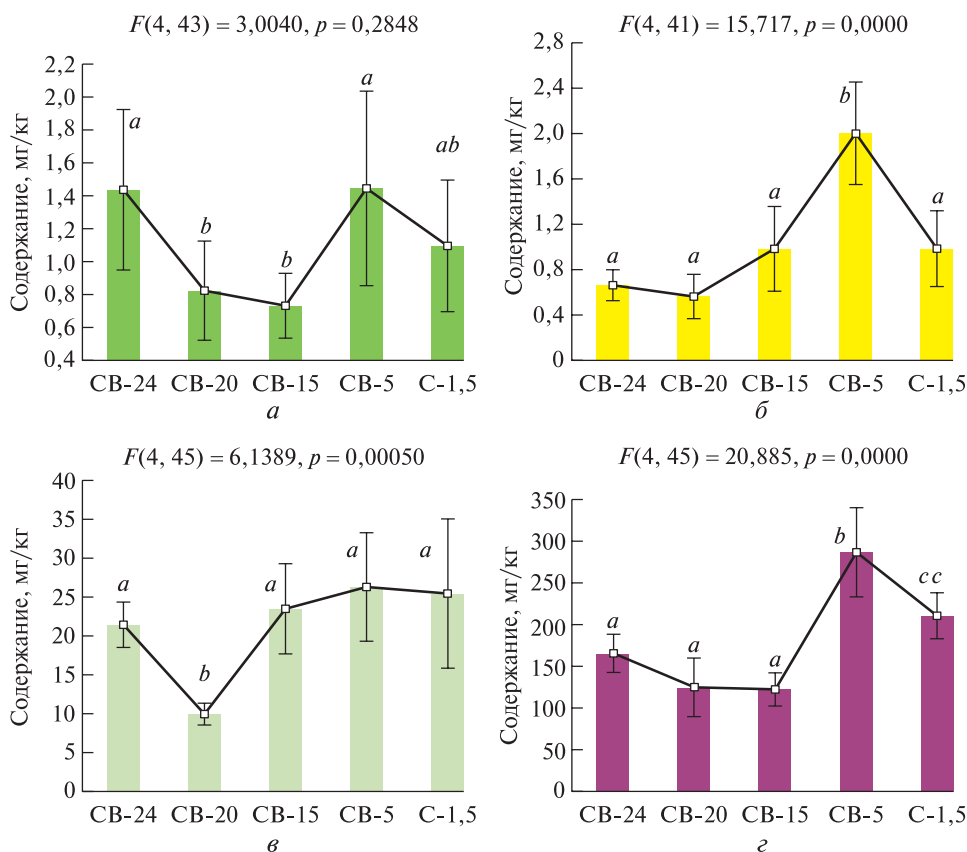


Рис. 4. Содержание кобальта (а), хрома (б), никеля (в) и железа (г) в листьях березы повислой *B. pendula* на различном расстоянии АО «Карабашмедь». Одинаковые буквы над столбцами обозначают отсутствие статистически значимых отличий между ПП, *F*-критерии Фишера при 5%-м уровне значимости, $n = 15$. Вертикальные линии на столбцах обозначают стандартное отклонение (SD), индивидуальную изменчивость по 15 деревьям

Fig. 4. Content of cobalt (a), chromium (б), nickel (в) and iron (г) in leaves of *B. pendula* at different distances from Karabashmed JSC. Identical letters above the columns denote the absence of statistically significant differences between PPs, Fisher's *F*-criteria at 5% significance level, $n = 15$. Vertical lines on the columns denote standard deviation (SD), individual variability across 15 trees

нику загрязнения, содержание цинка в 4,3 раза выше нормальных концентраций и достигает 650...700 мг/кг. Виды *Betula* относят к растениям — концентраторам цинка [32], при этом листья по содержанию цинка могут служить биоиндикаторами, поскольку этот элемент концентрируется именно в случае техногенного загрязнения [33], а высокое его накопление свидетельствует об аэротехногенном загрязнении [34].

Содержание кадмия в листьях березы повислой на С-1,5 и СВ-5 составляет $2,3 \pm 0,5$ мг/кг и $1,1 \pm 0,1$ мг/кг соответственно, что выше нормальных концентраций этого микроэлемента в 11 раз на ПП, находящихся на расстоянии 1,5 км, и в 5,6 раза — на расстоянии 5 км. Содержание кадмия на более удаленных от КМК ПП достоверно не отличается ($p < 0,05$) и не превышает нормальную концентрацию (0,2 мг/кг).

Содержание свинца на расстоянии 5...24 км от КМК составляет менее 10 мг/кг, что не превышает нормальные концентрации. На С-1,5 содержа-

ние свинца незначительно выше — $12 \pm 1,3$ мг/кг. В лесной подстилке и гумусо-аккумулятивном почвенном горизонте происходит накопление таких тяжелых металлов, как медь, цинк, свинец, железо и кадмий, что прослеживается на расстоянии до 10 км от КМК. В фоновых условиях (24 км) содержание железа, цинка и меди в снежном покрове ниже на 95 %, чем вблизи от источника загрязнения. Установлено превышение содержания тяжелых металлов — кобальта, хрома, никеля и меди в березовых древостоях, как приближенных к источнику загрязнения, так и в более удаленных. Содержание кобальта в листьях на СВ-24 и СВ-5 превышает нормальные значения в 1,5 раза, хрома на СВ-15 и С-1,5 — в 2 раза, на СВ-5 — в 4 раза. Содержание никеля достигает токсичных концентраций на СВ-20 (более 10 мг/кг), на остальных ПП превышает токсичные концентрации в 2,5 раза.

Концентрация меди на удаленных ПП изменяется от $6,3 \pm 0,2$ мг/кг до $7 \pm 0,2$ мг/кг и не превышает нормальные значения (5...30 мг/кг).

На С-1,5 содержание меди составляет $16 \pm 0,6$ мг/мг. Кадмий, никель, хром и кобальт, как правило, являются для березы повислой элементами слабого поглощения и среднего захвата [13].

Анализ связи содержания тяжелых металлов с жизненным состоянием деревьев выявил следующее (см. таблицу). Получена положительная корреляционная связь параметров жизненного состояния с содержанием поллютантов (коэффициенты корреляции на уровне 0,4...0,6). С ухудшением состояния березового древостоя, содержание тяжелых металлов в листьях увеличивается. Результаты корреляционного анализа показали наличие достоверных положительных связей между параметрами жизненного состояния и накоплением в листе кадмия ($r = 0,46 \dots 0,58$), меди ($r = 0,59 \dots 0,61$), свинца ($r = 0,48 \dots 0,56$), цинка ($r = 0,41 \dots 0,54$). Отмечается положительная корреляция дефолиации ($r = 0,44$) и санитарного состояния ($r = 0,34$) с содержанием железа и дефолиации ($r = 0,40$) и санитарного состояния ($r = 0,37$) с содержанием никеля. Содержание кобальта и хрома в листе не коррелирует с дефолиацией, дехромацией и санитарным состоянием древостоя.

Выводы

Установлено комплексное негативное воздействие на березовые древостои на расстоянии до 5 км к северо-востоку от КМК. Воздействие на фотосинтетический аппарат происходит как через прямое влияние аэрополлютантов, в большей степени диоксида серы, а также через поступление тяжелых металлов и серы из почвы. Наибольшее влияние на растительность в зоне действия КМК оказывают диоксид серы, кадмий, свинец, медь и цинк. Выявленное ухудшение состояния березовых древостоев с увеличением содержания тяжелых металлов в листьях, подтверждает прямую корреляционную связь параметров жизненного состояния (дефолиация, дехромация и категория состояния) с содержанием тяжелых металлов и серы (коэффициенты корреляции 0,4...0,6). Полученные результаты свидетельствуют о связи содержания поллютантов в листьях берез с жизненным состоянием древостоя и позволяют прогнозировать деградацию древостоя при воздействии аэротехногенного загрязнения.


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

Список литературы

- [1] Коротеева Е.В., Веселкин Д.В., Куянцева Н.Б., Мумбер А.Г., Чашина О.Е. Накопление тяжелых металлов в разных органах березы повислой возле Карабашского медеплавильного комбината // *Агрехимия*. 2015. № 3. С. 88–96
- [2] Шнейдмиллер Н.Ф., Мамедов Г.Р. Особенности развития малых городов России в условиях экологического кризиса на примере города Карабаш Челябинской области // *Вестник Кемеровского государственного университета*. Серия: Политические, социологические и экономические науки, 2018. № 3. С. 183–190. DOI:10.21603/2500-3372-2018-3-183-190
- [3] Доклад об экологической ситуации в Челябинской области в 2020 году. Челябинск: Изд-во Министерства экологии Челябинской области, 2021, 385 с.
- [4] Доклад об экологической ситуации в Челябинской области в 2014 году. Челябинск: Изд-во Министерства экологии Челябинской области, 2015, 204 с.
- [5] Синдирева А.В., Бурмирова А.С., Клименко В.В., Нуртазина В.К., Серeda М.С. Содержание цинка и меди в почвах национального парка «Таганай» (Южный урал) // *Социально-экологические технологии*, 2022. Т. 12. № 1. С. 43–61.
- [6] Shabanov M.V., Marichev M.S., Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Nevidomskaya D.G. Assessment of the impact of industry-related air emission of arsenic in the soils of forest ecosystems // *Forests*, 2023, t. 14, no. 3, p. 632.
- [7] Тагирова О.В., Ольберг О.В. Оценка состояния березы повислой (*Betula pendula* Roth) в условиях загрязнения окружающей среды выбросами медеплавильного комбината г. Карабаш, Челябинская область // *Устойчивое развитие территорий: теория и практика*. Материалы II Междунар. науч.-практ. конф. Сибай: Издательский дом «Республика Башкортостан», 2021. С. 245–247.
- [8] Усольцев В.А., Мезенцев А.Т., Кох Е.В., Крудышев В.В., Лазарев И.С. О возможности использования унифицированных аллометрических уравнений фитомассы деревьев // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*, 2012. № 3 (89). С. 37–40.
- [9] Бачурина А.В. Влияние аэропрывбросов ЗАО «Карабашмедь» на таксационные показатели и санитарное состояние сосновых и березовых древостоев // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*, 2007. № 181. С. 35–40.
- [10] Глинских А.Д. Биогеохимические особенности сосняков лесостепи Челябинской области // *Экосистемы*, 2023. № 34. С. 30–35.
- [11] Ситников И.А., Шаихова Д.Р., Чукина Н.В., Киселева И.С. Влияние аэротехногенного загрязнения на фотосинтетический аппарат растений *Scorzonera glabra* Rupr // *Ученые записки Петрозаводского государственного университета*, 2016. № 8 (161). С. 84–90.
- [12] Ночевный А.Д., Тептина А.Ю. Анализ фертильности пыльцы в ценопопуляциях видов рода *Alyssum* L. на южном Урале // *Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии*, 2020. № 19–2. С. 325–330.
- [13] Бухарина, И.Л., Двоеглазова А.А. Биоэкологические особенности травянистых и древесных растений в городских насаждениях. Ижевск: Изд-во Удмуртского университета, 2010. 184 с.
- [14] Zavyalov K.E., Menshikov S.L., Mokhnachev P.E. Application of ameliorants for recultivation of technogenic-disturbed lands by aerotechnogenic emissions of magnesite production // *AIP Conference Proceedings*. 4th International Conference on Modern Synthetic Methodologies for Creating Drugs and Functional Materials, MOSM 2020. American Institute of Physics Inc., 2021, p. 040024.
- [15] Уразгильдин Р.В., Кулагин А.Ю. Развитие классификации адаптивных стратегий растительности применительно к древесным видам и техногенезу и оценка на ее основе лесообразователей предруралья // *Известия Уфимского научного центра РАН*, 2017. № 4–1. С. 126–130.
- [16] Fernandes, J.C., Henriques F.S. Biochemical, physiological, and structural effect of excess copper in plants // *The Botanical Rev*, 1991, v. 57, no. 3, pp. 246–254.

- [17] Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях / Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 439 с.
- [18] Кузнецова Т.Ю., Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф. Аккумуляция тяжелых металлов в различных органах и тканях березы в зависимости от условий произрастания // Труды Карельского научного центра РАН, 2015. № 1. С. 86–94. DOI:10.17076/eco27
- [19] Clemens S. Molecular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis // *Planta*, 2001, v. 212, pp. 475–486.
- [20] Кузнецов В.В., Дмитриева Г.А. Физиология растений. М.: Высшая школа, 2006. 742 с.
- [21] Титов А.Ф. Устойчивость растений к тяжелым металлам. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2007. 172 с.
- [22] Дзугаев М.Д. Карабаш — город «экологического бедствия» // Вестник Челябинского государственного университета. Серия: Право, 2003. № 2(6). С. 92–97.
- [23] Залесов С.В., Бачурина А.В., Бачурина С.В. Состояние лесных насаждений, подверженных влиянию промышленных поллютантов ЗАО «Карабашмедь», и реакция их компонентов на проведение рубок обновления. Екатеринбург: УГЛТУ, 2017. 277 с.
- [24] Калабин Г.В., Титова А.В., Шаров А.В. Модернизация медеплавильного производства комбината ЗАО «Карабашмедь» и динамика состояния природной среды в зоне его влияния // Маркшейдерия и недропользование, 2011. № 3 (53). С. 65–70.
- [25] Методика организации и проведения работ по наблюдению за лесами в европейской части России в рамках программы ИКП-Леса (методика ЕКО ООН). М.: Федеральная служба лесного хозяйства России, 1995. 42 с.
- [26] Ковалев Б.И. Состояние заподоченных сосновых лесов // Лесное хозяйство, 1993. № 5. С. 35–38.
- [27] Macdonald A.D., Mothersill D.H. Shoot development in *Betula papyrifera*. I. Short-shoot organogenesis // *Can. J. Bot.*, 1983, pp. 3049–3065.
- [28] Воробейчик Е.Л., Хантемирова Е.В. Реакция лесных фитоценозов на техногенное загрязнение: зависимость доза-эффект // *Экология*, 1994. № 3. С. 31–43.
- [29] Шабанов М.В. Сера в геохимически сопряженных ландшафтах Соймоновской долины Челябинской области // Известия УГТУ, 2021. Вып. 1 (61). С. 118–126. DOI 10.21440/2307-2091-2021-1-118-126
- [30] Менщиков С.Л., Ившин А.П. Закономерности трансформации предтундровых и таежных лесов в условиях аэротехногенного загрязнения. Екатеринбург, 2006. 294 с.
- [31] Urazgildin R.V., Kulagin A.Yu. Damage, adaptations, and strategies of tree species in technogenesis conditions: structural and functional levels of realization of adaptive potential // *Biology Bulletin Reviews*, 2022, t. 12, no. 4, pp. 441–457.
- [32] Цандекова О.Л. Аккумуляционная способность листьев древесных растений в условиях породного отвала кедровского угольного разреза // Бюллетень науки и практики, 2016. № 8 (9). С. 39–43.
- [33] Zakrzewska M., Klimek B. Trace Element Concentrations in Tree Leaves and Lichen Collected Along a Metal Pollution Gradient Near Olkusz (Southern Poland) // *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 2017, no. 100(2), pp. 245–249.
- [34] Kosiorek M., Modrzewska B., Wyszowski M. Levels of selected trace elements in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), silver birch (*Betula pendula* L.), and Norway maple (*Acer platanoides* L.) in an urbanized environment // *Environ. Monit. Assess.*, 2016, no. 188(10), p. 598.

Сведения об авторах

Горбунова Виктория Дмитриевна  — канд. биол. наук, науч. сотр. лаборатории техногенных растительных сообществ, ФГБУН «Ботанический сад УрО РАН», botgarden.gor@yandex.ru

Менщиков Сергей Леонидович — д-р с.х. наук, вед. науч. сотр. лаборатории техногенных растительных сообществ, ФГБУН «Ботанический сад УрО РАН», msl@botgard.uran.ru

Поступила в редакцию 07.03.2024.

Одобрено после рецензирования 15.07.2024.

Принята к публикации 05.09.2024.

CONNECTION BETWEEN POLLUTANT CONTENT IN SILVER BIRCH LEAVES AND STAND VITAL STATE AT JSC «KARABASHMED»

V.D. Gorbunova , **S.L. Menshchikov**

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

botgarden.gor@yandex.ru

The paper analyzes the connection between the pollutants content (sulfur and heavy metals) in birch leaves and the vital state of the stand. It was found that metals such as cadmium, lead, copper and zinc have the greatest influence on the state of stands in the operating area of Karabashmed JSC. A positive correlation between the parameters of the vital state (defoliation, dechromation and the category of the state) and the content of these trace elements (correlation coefficients greater than 0,4...0,6) was revealed. An increase in the concentration of such heavy metals as cadmium, lead, zinc, copper and chromium in birch leaves in the trial plots closest to the pollution emission source by JSC «Karabashmed» was found.

Keywords: silver birch, heavy metals, aerotechnogenic emissions

Suggested citation: Gorbunova V.D., Menshchikov S.L. *Svyaz' sodержaniya pollyutantov v list'yakh berezy povisloy s zhiznennym sostoyaniem drevostoya na primere AO «Karabashmed'»* [Connection between pollutant content in silver birch leaves and stand vital state at JSC «Karabashmed»]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 5, pp. 129–137. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-129-137


References

- [1] Koroteeva E.V., Veselkin D.V., Kuyantseva N.B., Mumber A.G., Chashchina O.E. *Nakoplenie tyazhelykh metallov v raznykh organakh berezy povisloy vozle Karabashskogo medeplavil'nogo kombinata* [Accumulation of heavy metals in different organs of silver birch near the Karabash copper smelter]. *Agrokhimiya* [Agrochemistry], 2015, no. 3, pp. 88–96.
- [2] Shneydmiller N.F., Mamedov G.R. *Osobennosti razvitiya malykh gorodov Rossii v usloviyakh ekologicheskogo krizisa na primere goroda Karabash Chelyabinskoy oblasti* [Features of the development of small towns in Russia in conditions of environmental crisis using the example of the city of Karabash in the Chelyabinsk region]. *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Politicheskie, sotsiologicheskie i ekonomicheskie nauki* [Bulletin of Kemerovo State University. Series: Political, sociological and economic sciences], 2018, no. 3, pp. 183–190. DOI:10.21603/2500-3372-2018-3-183-190
- [3] *Doklad ob ekologicheskoy situatsii v Chelyabinskoy oblasti v 2020 godu* [Report on the environmental situation in the Chelyabinsk region in 2020]. Chelyabinsk: Ministry of Ecology of the Chelyabinsk Region, 2021, 385 p.
- [4] *Doklad ob ekologicheskoy situatsii v Chelyabinskoy oblasti v 2014 godu* [Report on the environmental situation in the Chelyabinsk region in 2014]. Chelyabinsk: Ministry of Ecology of the Chelyabinsk Region, 2015, 204 p.
- [5] Sindireva A.V., Burmistrova A.S., Klimenko V.V., Nurtazina V.K., Sereda M.S. *Soderzhanie tsinka i medi v pochvakh natsional'nogo parka «Taganay» (Yuzhnyy ural)* [The content of zinc and copper in the soils of the Taganay National Park (Southern Urals)]. *Sotsial'no-ekologicheskoe tekhnologii* [Social and environmental technologies], 2022, t. 12, no. 1, pp. 43–61.
- [6] Shabanov M.V., Marichev M.S., Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Nevidomskaya D.G. Assessment of the impact of industry-related air emission of arsenic in the soils of forest ecosystems. *Forests*, 2023, t. 14, no. 3, p. 632.
- [7] Tagirova O.V., Ol'berg O.V. *Otsenka sostoyaniya berezy povisloy (Betula pendula Roth) v usloviyakh zagryazneniya okruzhayushchey sredy vybrosami medeplavil'nogo kombinata g. Karabash, Chelyabinskaya oblast'* [Assessment of the condition of silver birch (*Betula pendula* Roth) in conditions of environmental pollution by emissions from the Karabash copper smelter, Chelyabinsk Region]. *Ustoychivoe razvitiye territoriy: teoriya i praktika. Materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Sibay: Sibayskiy informatsionnyy tsentr — filial GUP RB Izdatel'skiy dom «Respublika Bashkortostan»* [Sustainable development of territories: theory and practice. Materials of the II International Scientific and Practical Conference]. Sibay: Sibay Information Center — branch of the State Unitary Enterprise of the Republic of Belarus Publishing House «Republic of Bashkortostan», 2021, pp. 245–247.
- [8] Usol'tsev V.A., Mezentsev A.T., Kokh E.V., Krudyshev V.V., Lazarev I.S. *O vozmozhnosti ispol'zovaniya unifikirovannykh allometricheskikh uravneniy fitomassy derev'ev* [On the possibility of using unified allometric equations of phytomass of trees]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Altai State Agrarian University], 2012, no. 3(89), pp. 37–40.
- [9] Bachurina A.V. *Vliyaniye aeropromvybrosov ZAO «Karabashmed'» na taksatsionnye pokazateli i sanitarnoe sostoyaniye sosnovykh i berezovykh drevostoev* [The influence of aeroprom emissions of Karabashmed CJSC on the taxation indicators and sanitary condition of pine and birch stands]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Bulletin of the St. Petersburg Forest Engineering Academy], 2007, no. 181, pp. 35–40.
- [10] Glinkikh A.D. *Biogekhimicheskie osobennosti sosnyakov lesostepi chelyabinskoy oblasti* [Biogeochemical features of pine forests in the forest-steppe of the Chelyabinsk region]. *Ekosistemy* [Ecosystems], 2023, no. 34, pp. 30–35.
- [11] Sitnikov I.A., Shaikhova D.R., Chukina N.V., Kiseleva I.S. *Vliyaniye aerotekhnogenogo zagryazneniya na fotosinteticheskiy apparat rasteniy Scorzonera glabra Rupr* [The influence of aerotechnogenic pollution on the photosynthetic apparatus of plants *Scorzonera glabra* Rupr]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta* [Scientific notes of Petrozavodsk State University], 2016, no. 8 (161), pp. 84–90.
- [12] Nochevnyy A.D., Teptina A.Yu. *Analiz fertil'nosti pyl'tsy v tsenopopulyatsiyakh vidov roda Alyssum L. na yuzhnom Urale* [Analysis of pollen fertility in cenopopulations of species of the genus *Alyssum* L. in the southern Urals]. *Problemy botaniki Yuzhnoy Sibiri i Mongolii* [Problems of Botany of Southern Siberia and Mongolia], 2020, no. 19–2, pp. 325–330.
- [13] Bukharina, I.L., Dvoeglazova A.A. *Bioekologicheskie osobennosti travyanistykh i drevesnykh rasteniy v gorodskikh nasazhdeniyakh* [Bioecological features of herbaceous and woody plants in urban plantings]. Izhevsk: Udmurt University Publishing House, 2010, 184 p.
- [14] Zavalov K.E., Menschikov S.L., Mokhnachev P.E. Application of ameliorants for recultivation of technogenic-disturbed lands by aerotechnogenic emissions of magnesite production. AIP Conference Proceedings. 4th International Conference on Modern Synthetic Methodologies for Creating Drugs and Functional Materials, MOSM 2020. American Institute of Physics Inc., 2021, p. 040024.
- [15] Urazgil'din R.V., Kulagin A.Yu. *Razvitie klassifikatsii adaptivnykh strategiy rastitel'nosti primenitel'no k drevesnym vidam i tekhnogenezu i otsenka na ee osnove lesoobrazovateley predural'ya* [Development of classification of adaptive vegetation strategies in relation to woody species and technogenesis and assessment on its basis of forest growers of the Urals]. *Izvestiya Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2017, no. 4–1, pp. 126–130.
- [16] Fernandes, J.C., Henriques F.S. Biochemical, physiological, and structural effect of excess copper in plants. *The Botanical Rev*, 1991, v. 57, no. 3, pp. 246–254.
- [17] Kabata-Pendias A., Pendias X. *Mikroelementy v pochvakh i rasteniyakh* [Microelements in soils and plants]. Moscow: Mir, 1989, 439 p.
- [18] Kuznecova T.Yu., Vetchinnikova L.V., Titov A.F. *Akkumulyatsiya tyazhelykh metallov v razlichnykh organakh i tkanyakh berezy v zavisimosti ot usloviy proizvodstva* [Accumulation of heavy metals in various organs and tissues of birch depending on growing condition] // *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN*, 2015. № 1. S. 86–94. DOI:10.17076/eco27
- [19] Clemens S. Molecular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis. *Planta*, 2001, v. 212, pp. 475–486.
- [20] Kuznetsov V.V., Dmitrieva G.A. *Fiziologiya rasteniy* [Physiology of plants]. Moscow: Higher School, 2006, 742 p.
- [21] Titov A.F. *Ustoychivost' rasteniy k tyazhelym metallam* [Plant resistance to heavy metals]. Petrozavodsk: Publishing house KarRC RAS, 2007, 172 p.

- [22] Dzugaev M.D. *Karabash — gorod «ekologicheskogo bedstviya»* [Karabash is a city of «ecological disaster»]. Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Pravo [Bulletin of Chelyabinsk State University. Series: Law], 2003, no. 2(6), pp. 92–97.
- [23] Zalesov S.V., Bachurina A.V., Bachurina S.V. *Sostoyaniye lesnykh nasazhdeniy, podverzhennykh vliyaniyu promyshlennykh pollyutantov ZAO «Karabashmed», i reaktsiya ikh komponentov na provedeniye rubok obnovleniya* [The state of forest plantations exposed to the influence of industrial pollutants of JSC «Karabashmed», and the reaction of their components to renewal felling]. Ekaterinburg: UGFLTU, 2017, 277 p.
- [24] Kalabin G.V., Titova A.V., Sharov A.V. *Modernizatsiya medepavil'nogo proizvodstva kombinata ZAO «Karabashmed» i dinamika sostoyaniya prirodnoy sredy v zone ego vliyaniya* [Modernization of copper smelting production at the Karabashmed CJSC plant and the dynamics of the state of the natural environment in the zone of its influence]. Marksheyderiya i nedropol'zovanie [Mine surveying and subsoil use], 2011, no. 3 (53), pp. 65–70.
- [25] *Metodika organizatsii i provedeniya rabot po nablyudeniyu za lesami v evropeyskoy chasti Rossii v ramkakh programmy ICP-Lesa (metodika EKO OON)* [Methodology for organizing and conducting forest monitoring work in the European part of Russia within the framework of the ICP-Forests program (UNECF methodology)]. Moscow: Federal Forestry Service of Russia, 1995, 42 p.
- [26] Kovalev B.I. *Sostoyaniye zapodsochennykh sosnovykh lesov* [The state of weeded pine forests]. Lesnoe khozyaystvo [Forestry], 1993, no. 5, pp. 35–38.
- [27] Macdonald A.D., Mothersill D.H. Shoot development in *Betula papyrifera*. I. Short-shoot organogenesis. Can. J. Bot., 1983, pp. 3049–3065.
- [28] Vorobeychik E.L., Khantemirova E.V. *Reaktsiya lesnykh fitotsenozov na tekhnogennoye zagryazneniye: zavisimosti doza-effekt* [Response of forest phytocenoses to technogenic pollution: dose-effect dependencies]. Ekologiya [Ecology], 1994, no. 3, pp. 31–43.
- [29] Shabanov M.V. *Sera v geokhimicheski sopryazhennykh landshaftakh Coymonovskoy doliny Chelyabinskoy oblasti* [Sulfur in geochemically related landscapes of the Soymonovskaya valley of the Chelyabinsk region]. Izvestiya UGGU [News of the USGU], 2021, v. 1 (61), pp. 118–126. DOI 10.21440/2307-2091-2021-1-118-126
- [30] Menshchikov S.L., Ivshin A.P. *Zakonomernosti transformatsii predtundrovyykh i taezhnykh lesov v usloviyakh aerotekhnogennoy zagryazneniya* [Patterns of transformation of pre-tundra and taiga forests under conditions of aerotechnogenic pollution]. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2006, 294 p.
- [31] Urazgildin R.V., Kulagin A.Yu. Damage, adaptations, and strategies of tree species in technogenesis conditions: structural and functional levels of realization of adaptive potential. Biology Bulletin Reviews, 2022, t. 12, no. 4, pp. 441–457.
- [32] Tsandekova O.L. *Akkumuliruyushchaya sposobnost' list'ev drevesnykh rasteniy v usloviyakh porodnogo otvala kedrovskogo ugol'nogo razreza* [Accumulating capacity of leaves of woody plants in the conditions of the waste dump of the Kedrovsky coal mine]. Byulleten' nauki i praktiki [Bulletin of Science and practice], 2016, no. 8 (9), pp. 39–43.
- [33] Zakrzewska M., Klimek B. Trace Element Concentrations in Tree Leaves and Lichen Collected Along a Metal Pollution Gradient Near Olkusz (Southern Poland). Bull. Environ. Contam. Toxicol., 2017, no. 100(2), pp. 245–249.
- [34] Kosiorek M., Modrzewska B., Wyszowski M. Levels of selected trace elements in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), silver birch (*Betula pendula* L.), and Norway maple (*Acer platanoides* L.) in an urbanized environment. Environ. Monit. Assess., 2016, no. 188(10), p. 598.

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

Authors' information

Gorbunova Viktoria Dmitrievna  — Cand. Sci. (Biology), Researcher of the Laboratory of Technogenic Plant Communities of the Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, botgarden.gor@yandex.ru

Menshchikov Sergey Leonidovich — Dr. Sci. (Agriculture), Leading Researcher of the Laboratory of Technogenic Plant Communities of the Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, msl@botgard.uran.ru

Received 07.03.2024.

Approved after review 15.07.2024.

Accepted for publication 05.09.2024.

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 ПОЗДНИХ ВЕСЕННИХ ЗАМОРОЗКОВ НА ПЛОДОНОШЕНИЕ КЕДРА СИБИРСКОГО (*PINUS SIBIRICA* DU TOUR) В ИЗМЕНЯЮЩЕМСЯ КЛИМАТЕ

С.Н. Велисевич, А.В. Попов[✉], М.А. Мельник, С.Н. Горошкевич

ФГБУН «Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук» (ИМКЭС СО РАН), Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, д. 10/3

tomskceltic@gmail.com

Рассмотрена динамика плодоношения кедра сибирского за период с 1990 по 2023 гг. для установления влияния погодных условий весной в год опыления на последующий урожай. Установлено, что за последние два десятилетия среднееголетний уровень количества созревших шишек снизился почти на четверть от уровня, характерного для стабильного климата и характерное для прежнего климата чередование высоких и низких урожаев сменилось чередованием средних и низких. Высказано предположение, что одной из причин появления негативного тренда в динамике плодоношения являются поздние весенние заморозки, которые, несмотря на потепление климата, остались в прежних временных рамках. Количество зрелых шишек в кроне во многом зависело от весенней погоды в год опыления и отрицательно коррелировало с суммой активных температур выше +5 °С, накопленной до наступления поздних весенних заморозков. Величина этого показателя, в свою очередь, определялась температурой апреля. В годы, когда поздние весенние заморозки случались при небольшой сумме активных температур (менее 100 градусов), урожай шишек был большим. Напротив, когда перед заморозками накапливалось 300 градусов и более, урожай шишек был минимальным. Также отмечены изменения в сроках наступления последних весенне-летних заморозков, в среднем наблюдается тенденция сдвига сроков последних заморозков к более поздним датам. Предполагается, что при дальнейшем потеплении климата начало весеннего развития репродуктивных структур будет происходить в более ранние сроки, поэтому репродуктивные структуры будут сильнее повреждаться поздними весенними заморозками, поскольку последние остаются в прежних временных рамках. Обильные урожаи у кедра сибирского смогут формироваться лишь в отдельные годы с поздней весной и/или при отсутствии поздних весенних заморозков.

Ключевые слова: кедр сибирский, *Pinus sibirica* Du Tour, плодоношение, климат, весенние заморозки

Ссылка для цитирования: Велисевич С.Н., Попов А.В., Мельник М.А., Горошкевич С.Н. Влияние поздних весенних заморозков на плодоношение кедра сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour) в изменяющемся климате // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 5. С. 138–152. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-138-152

Погодные факторы считаются важнейшими регуляторами плодоношения лесных древесных видов [1]. В настоящее время повсеместно отмечается изменение характера плодоношения вследствие потепления климата [2, 3]. В связи с этим осуществляются попытки прогноза будущих урожаев на основе анализа средних значений температуры воздуха и количества осадков за год, сезон или месяц [4]. При этом следует учитывать, что различные факторы действуют на разных пространственных и временных уровнях, поэтому доля их влияния существенно зависит от климатических условий и конкретного вида. В отдельных случаях реальную прогностическую ценность имеет анализ краткосрочных погодных явлений, действующих на протяжении определенных критических периодов развития репродуктивных структур [5, 6]. В частности, наиболее чувствительным этапом генеративного морфогенеза, как показано на примере различ-

ных видов хвойных, является весенний сезон, предшествующий цветению, когда происходят дифференциация репродуктивных структур и мейоз [7–12]. В этот период даже низкие положительные температуры воздуха могут вызвать нарушения морфогенеза генеративных органов [7].

Весенние заморозки, как и прочие случайные погодные аномалии, трудно поддаются прогнозу, и по этой причине их сложно учитывать при построении климатических моделей [13]. Тем не менее современные заморозки чаще обсуждают в мировой литературе, поскольку влекут за собой значительный экологический и экономический ущерб. Например, «ложная весна» («false spring») в марте и последовавшие за ней весенние заморозки в апреле 2007 г. вызвали гибель урожая плодовых культур на востоке США [14]. К тому же теплая погода в апреле 2017 г. [15] и апреле 2021 г. [16] обусловила раннее наступление весны, которая сменилась заморозками, повлекшими за собой гибель будущего урожая в садах и виноградниках многих стран Европы.



Рис. 1. Макростробилы кедр сибирского во время опыления, поврежденные возвратными заморозками: *а* — за два дня до заморозков; *б* — спустя два дня после заморозков; *в* — спустя шесть дней после заморозков; *г* — спустя десять дней после заморозков

Fig. 1. Macrostrombiles of Siberian stone during pollination damaged by return frosts: *a* — two days before frost; *б* — two days after frost; *в* — six days after frost; *г* — ten days after frost

Такие случаи вряд ли можно напрямую объяснить глобальными климатическими изменениями. Однако появляются доказательства, что они сопровождаются расширением диапазона колебаний температуры воздуха, способствующим увеличению частоты погодных аномалий [17], в том числе поздним весенним заморозкам [16, 18]. Мягкая зима и теплая ранняя весна, ожидаемые на фоне потепления климата, будут способствовать преждевременному весеннему развитию растений и увеличат риск их повреждения заморозками [14], что подтверждают многочисленные исследования. Кроме того, несмотря на увеличение длительности безморозного периода, риск заморозков в период вегетации растений по-прежнему сохраняется [13, 19–22].

Изучаемый нами кедр сибирский (*Pinus sibirica* Du Tour) является хозяйственно важным орехоплодным видом. От урожая, его плодов, их количества и качества зависит не только успех его

собственного возобновления, но и возможность коммерческой заготовки семян. У кедр сибирского ярко выраженный неравномерный (без правильной периодичности) характер плодоношения, поскольку его репродуктивная система основана на взаимодействии с животными-консументами [23].

Суть этого взаимодействия заключается в том, что в неурожайные годы снижается численность животных — потребителей семян, в то время как в урожайные годы семян достаточно не только для животных, но и для возобновления самого кедр. В предшествующий климатический период (до начала потепления) высокие урожаи формировались два-три раза за десятилетие, в остальные годы они были средними или низкими [9, 24–26]. В настоящее время исчезли пиковые урожаи, что предположительно связано с изменениями климата [27]. Мы предполагаем, что основной причиной появления негативных тенденций могут быть поздние весенние заморозки,

нарушающие естественный ход генеративного морфогенеза.

Известно, что в климатических условиях Западной Сибири наиболее чувствительный период в развитии репродуктивных структур кедра сибирского приходится на конец мая — начало июня в год опыления (рис. 1), когда происходят дифференциация женского и мужского гаметофита и мейоз [9, 24, 28].

Именно в это время циркуляция атмосферного воздуха на юге региона характеризуется повышенной неустойчивостью [29] и высокой вероятностью возникновения погодных экстремумов, в частности поздних весенних заморозков [21, 22, 30, 31].

Цель работы

Цель работы — сопряженный анализ многолетней динамики плодоношения кедра сибирского в связи с погодными условиями весной в год опыления.

Материалы и методы

Исследования проводились на юге Западной Сибири, в междуречье р. Обь и р. Томь, в 22 км к северо-востоку от г. Томска. Этот район относится к южной окраине равнинной части ареала кедра сибирского. Климат здесь умеренно континентальный со средней годовой температурой воздуха $+1,16$ °C и среднегодовым количеством осадков 577 мм, согласно данным метеостанции г. Томска за последние 30 лет. В 1990 г. на первой надпойменной террасе р. Порос (левый приток р. Томь) заложена постоянная пробная площадь в припоселковом кедровнике мелкотравном (9К1Е+П), III класс бонитета, полнота 0,7. На момент исследования средний возраст деревьев кедра составил 180...220 лет, высота 24 м, диаметр ствола на высоте 1,3 м от поверхности земли 64 см. Ежегодно с 1990 по 2023 г. учитывали урожай шишек в среднем с 37 деревьев (в разные годы 20...45). Количество шишек определяли в конце августа, сразу же после их созревания. Для этого с кроны на землю вручную отряхивались все шишки, затем проводился их подсчет. Для анализа связи между плодоношением и погодными условиями использовали показатель числа зрелых шишек на дерево.

Данные о погоде были получены с метеостанции в г. Томске, принадлежащей Федеральной службе по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) и расположенной в 20 км к востоку от исследуемой пробной площади. Проанализированы следующие метеорологические параметры:

– средняя температура воздуха вегетационного периода (с апреля по сентябрь);

– средняя температура воздуха в апреле;
– средняя температура воздуха в мае;
– дата последнего весеннего заморозка;
– температура последнего весеннего заморозка;

– сумма активных температур (САТ), представленная суммой средних суточных температур воздуха, превышающих порог $+5$ °C перед последним весенним заморозком от $-0,1$ °C;

– среднее за весь исследуемый период число дней с весенне-летними заморозками;

– среднедекадное число дней с весенне-летними заморозками;

– вероятность возникновения заморозка по декадам вегетационного периода, рассчитанная как отношение числа лет, в которые заморозок наблюдался в заданную декаду, к общему числу лет наблюдений.

Заморозком принято считать кратковременное понижение температуры воздуха или поверхности почвы до 0 °C и ниже, наблюдаемое в вегетационный период на фоне положительных средних суточных температур воздуха [32]. В данной работе заморозком считалось понижение температуры воздуха до отрицательных значений после того, как среднесуточная температура хотя бы один раз превысила $+5$ °C, т. е., когда потенциально возможен рост растений и когда заморозки могут негативно повлиять на этот процесс.

Результаты и обсуждение

Температура воздуха за вегетационный период (апрель — сентябрь) увеличилась в среднем на $0,4$ °C — с $+12,1$ °C в 1990–2005 гг. до $+12,5$ °C в 2006–2023 гг. В весенние месяцы более существенный прирост тепла наблюдался в апреле (рис. 2). Если в первой половине периода наблюдений температура воздуха в апреле в среднем составила $+1,5$ °C, то во второй — увеличилась до $+3,6$ °C. Для температуры воздуха в мае средние значения этих показателей составили $+11,5$ и $+10,0$ °C соответственно. Наблюдаемые положительные тенденции изменения температуры воздуха в мае во второй половине периода наблюдений обусловлены аномально теплой погодой в 2020 и 2022 гг. Если исключить из рассмотрения эти два года, многолетние тенденции температуры воздуха в мае будут практически нулевыми. Обращает на себя внимание и разная амплитуда изменчивости температуры воздуха в эти два месяца. В мае размах колебаний между минимальным и максимальным значением составил 7,9 градусов в первой половине периода наблюдений и 8,7 — во второй. В апреле эти значения были выше — 9,4 и 11,6 градуса соответственно. Таким образом, особые погодные

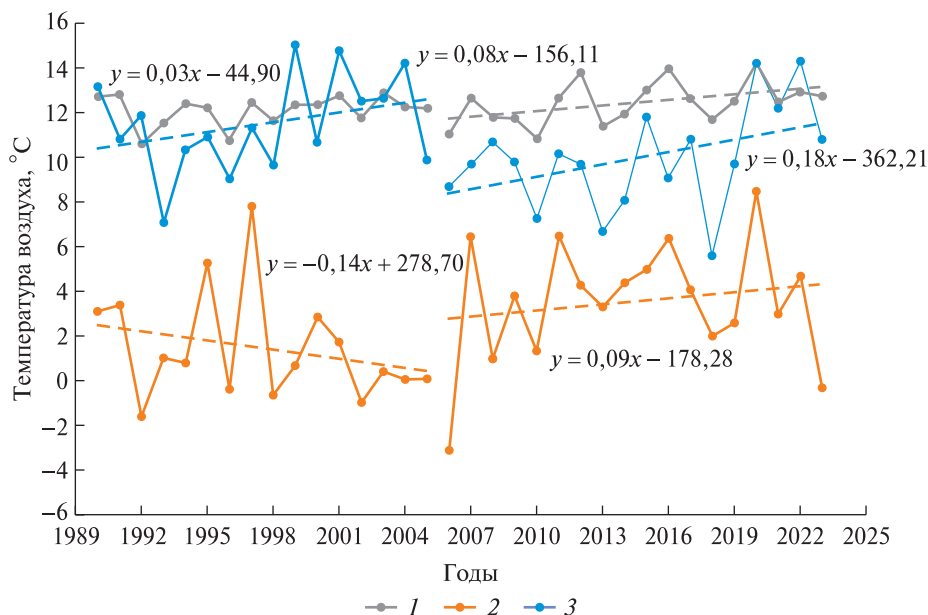


Рис. 2. Изменение средней температуры воздуха вегетационного периода, средней температуры воздуха в апреле и мае за периоды 1990–2005 гг. и 2006–2023 гг. (штриховой линией показана линия тренда признака): 1 — средняя температура воздуха вегетационного периода; 2 — средняя температура воздуха в апреле; 3 — средняя температура воздуха в мае

Fig. 2. Change in mean growing season air temperature, mean monthly April and May air temperature for the periods 1990–2005 and 2006–2023 (the dashed line shows the trend line of the feature): 1 — average air temperature during the growing season; 2 — average air temperature in April; 3 — average air temperature in May)

изменения в мае, которые могли бы повлиять на характер плодоношения кедра сибирского, не наблюдаются. Напротив, в апреле характер тенденций изменения температуры воздуха с отрицательного перешел на положительный и существенно возросла ее амплитуда.

Анализ сроков наступления весенних заморозков и их продолжительности показал, что в среднем за 34 года наблюдений основная угроза заморозков приходится на две первые декады мая (рис. 3). К концу мая риск их возникновения постепенно снижается. Заморозки в начале мая продолжительнее — в среднем от 1...3 сут. Заморозки в конце мая и начале июня весьма кратковременны и длятся всего несколько часов. Анализ частоты возникновения заморозков для двух временных периодов с 1990 по 2005 гг. и с 2006 по 2023 гг. показал их различное распределение по декадам мая и июня. Несмотря на то что среднее число дней с заморозками в первый период наблюдений составило 6,6 сут., а во второй — сократилось до 5,0 сут., вероятность их возникновения в третьей декаде мая возросла с 17,7 до 27,8 %, а в первой декаде июня — с 6 до 11 %. Это свидетельствует об опасности возникновения поздних весенне-летних заморозков на исследуемой территории.

Анализ динамики сроков наступления последних весенне-летних заморозков за 34 года показал их существенную изменчивость по годам. Кроме

того, в среднем отмечается тенденция сдвига сроков последних заморозков к более поздним датам (рис. 4). Если за первый период наблюдений не было ни одного случая заморозков после 30 мая, то во второй половине периода наблюдений таких случаев было четыре (2007, 2014, 2019 и 2022 гг.). В первой половине анализируемого периода заморозки случались примерно 13 мая, во второй — они сдвинулись на 19 мая, хотя в отдельные годы сроки могут различаться до 1,5 мес. Например, в 2020 г. последние заморозки были 15 апреля, после чего установилась теплая погода с положительными значениями температуры воздуха. В 2022 г. весна была довольно теплой, но 6 июня случились заморозки, и несмотря на то что температура снизилась всего до -1°C на несколько часов, будущий урожай шишек практически полностью погиб. Что касается температуры воздуха при заморозках, то можно констатировать, что за период наблюдений она существенно не изменилась: в первой половине анализируемого периода она составила $-1,9$, во второй $-1,6^{\circ}\text{C}$, т. е. диапазон ее изменчивости во второй половине анализируемого периода несколько сузился.

Для выявления связи между урожаем шишек и поздними весенне-летними заморозками были рассмотрены показатели, используемые при определении величины возможного риска, наносимого заморозками различным культурам, такие

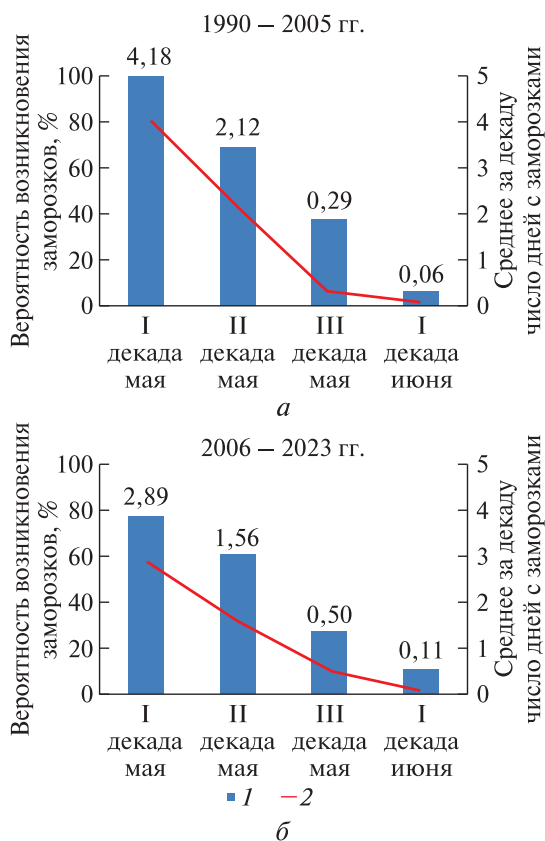


Рис. 3. Распределение вероятности возникновения весенне-летних заморозков по декадам месяца для двух временных периодов (а) 1990–2005 гг. и (б) 2006–2023 гг.: 1 — вероятность возникновения заморозков; 2 — среднее за декаду число суток с заморозками

Fig. 3. Distribution of the probability of occurrence of spring-summer frosts by decade of the month for two time periods (a) 1990–2005 and (b) 2006–2023: 1 — probability of frost occurrence; 2 — average number of days with frosts per decade

как сумма активных температур $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$, сумма эффективных температур $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура воздуха при заморозках, дата заморозков, и пр. Наилучшая корреляционная зависимость наблюдалась между динамикой САТ $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$, накопленной на дату позднего заморозка и урожаем шишек в следующем году ($r = -0,65$, достоверно при $p \leq 0,05$). На рис. 5 представлена обратная зависимость между этими признаками. В годы, когда последние заморозки случались при небольшом значении САТ, урожай шишек был высоким. Например, заморозки при $-4,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 16 мая 1998 г. никак не повлияли на последующий высокий (666 шт./с одного дерева) урожай шишек в 1999 г., поскольку накопленная САТ была небольшой (98 градусов). Заморозки при $-3,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 2 мая 2002 г. (при САТ 34 градуса), также не оказали влияния на высокий урожай (634 шт./с одного дерева) в 2003 г. Заморозки при $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 7 мая 2006 г. (при САТ 11 градуса) не повлияли на урожай (637 шт./с одного дерева) в 2007 г.

Рекордный за период наблюдений урожай 1993 г. — 740 шишек с одного дерева сформировался также благодаря отсутствию в 1992 г. заморозков начиная с 5 мая, хотя апрель был холодный и к дате последних заморозков САТ составила 0 градусов.

Напротив, в годы, когда к дате последних заморозков накапливалась высокая САТ, урожай шишек был минимальным. Например, даже небольшие заморозки ($-1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$), случившиеся 28 мая 2003 г., погубили почти весь урожай шишек в 2004 г. (урожай составил 28 шт./с одного дерева), поскольку накопленная САТ составила 372 градуса.

Заморозки при $-1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 31 мая 2007 г. (при САТ 435 градусов), также привели к потерям урожая в 2008 г. (урожай составил 30 шт./с одного дерева). Поздние и совсем незначительные ($-0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$) заморозки 3 июня 2014 г. полностью погубили урожай 2015 г., заморозки при $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 6 июня 2022 г. (при рекордной САТ в 595 градусов) также привели к неурожаю в 2023 г.

Тенденции динамики урожая шишек и САТ зеркально противоположны (рис. 6), причем отрицательная связь между этими признаками усилилась в течение периода наблюдений: с $r = -0,551$ в первой половине до $r = -0,771$ во второй (оба коэффициента достоверны при $p \leq 0,05$). В первой половине анализируемого периода среднемноголетний уровень количества шишек на одно дерево составил 353 шт. (см. рис. 6, а). Во второй половине он существенно снизился и составил 259 шт. Явно изменился и сам характер цикличности урожаев. Если до 2005 г. довольно высокие урожаи (более 500 шишек с одного дерева) отмечались 6 раз, то начиная с 2006 г. их было всего три, причем последний был пять лет тому назад — в 2019 г. Число нулевых или почти нулевых урожаев при этом осталось примерно на том же уровне. В первой половине анализируемого периода средние урожаи были редко, в основном чередовались высокие и низкие. Во второй половине наблюдалось чередование средних и низких урожаев.

Противоположная тенденция наблюдается в динамике накопления САТ накануне последних весенних заморозков (см. рис 6, б). В первой половине анализируемого периода заморозки в среднем случались при достижении среднемноголетнего уровня 150 градусов, во второй — при 244 градусах, причем диапазон колебаний расширился. Различия почти на 100 градусов говорят о том, что в последние два десятилетия погодные условия существенно изменились, обуславливая развитие репродуктивных структур накануне цветения и опыления.

Как следует из рис. 5, все хорошие урожаи сформировались в условиях, когда САТ, накопленных

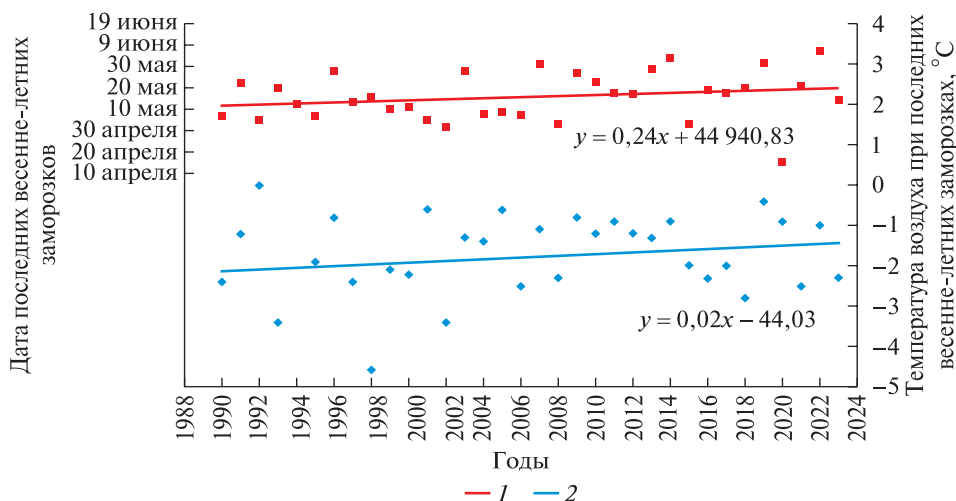


Рис. 4. Даты наступления последних весенне-летних заморозков и значения температуры воздуха за период наблюдения (1990–2023 гг.): 1 — линия тренда даты последних весенне-летних заморозков; 2 — линия тренда температуры воздуха последних весенне-летних заморозков

Fig. 4. Dates of the last spring-summer frosts and air temperature values during the observation period (1990–2023): 1 — trend line for the date of the last spring-summer frosts; 2 — trend line of air temperature of the last spring-summer frosts

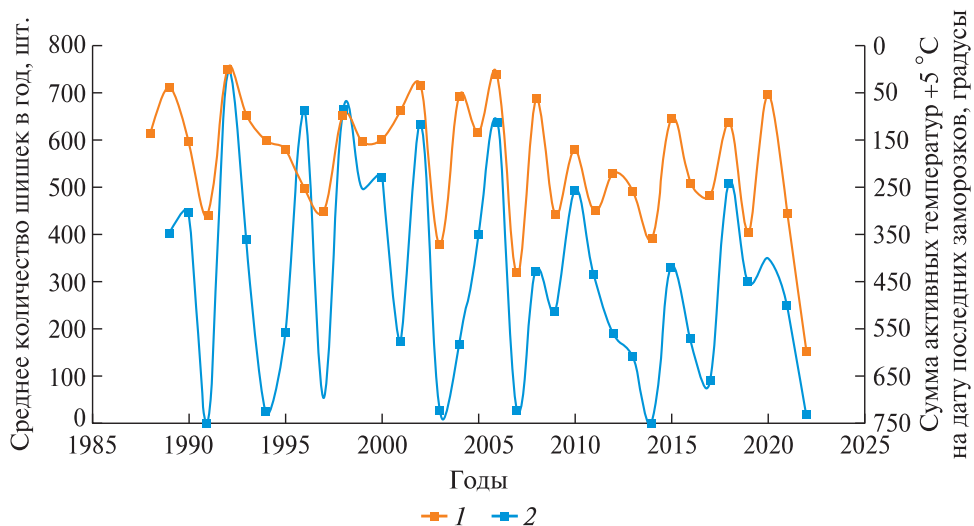


Рис. 5. Обратная зависимость урожая шишек и динамики суммы активных температур выше +5 °С, накопленной на дату последних весенне-летних заморозков в год опыления с 1989 по 2023 гг.: 1 — урожай шишек; 2 — сумма активных температур выше +5 °С на дату последних заморозков

Fig. 5. Inverse relationship between the yield of cones and the dynamics of the sum of active temperatures above +5 °C, accumulated on the date of the last spring-summer frosts in the year of pollination from 1989 to 2023: 1 — yield of cones; 2 — the sum of active temperatures above +5 °C on the date of the last frost

перед заморозками, составляла 100...130 градусов, поэтому прирост этого показателя на 100 градусов за последние два десятилетия значительно увеличивает риск развития репродуктивных структур. Изменился и характер динамики накопления САТ: возросла амплитуда колебаний этого показателя. Так, в первой половине периода наблюдений аномально ранняя весна, когда САТ перед заморозками достигала 300 градусов и более, была редкостью, и случалась примерно раз

в 5–6 лет. Во второй половине анализируемого периода, напротив, редкостью стала поздняя весна, когда САТ накануне последних заморозков не превышала 100 градусов.

Температура воздуха в мае существенно не влияла на величину САТ выше +5 °С ($r = -0,205$), при которой были последние весенние заморозки. Температура воздуха в апреле, напротив, оказалась довольно тесно связанной с этим показателем ($r = +0,505$, достоверно при $p \leq 0,05$).

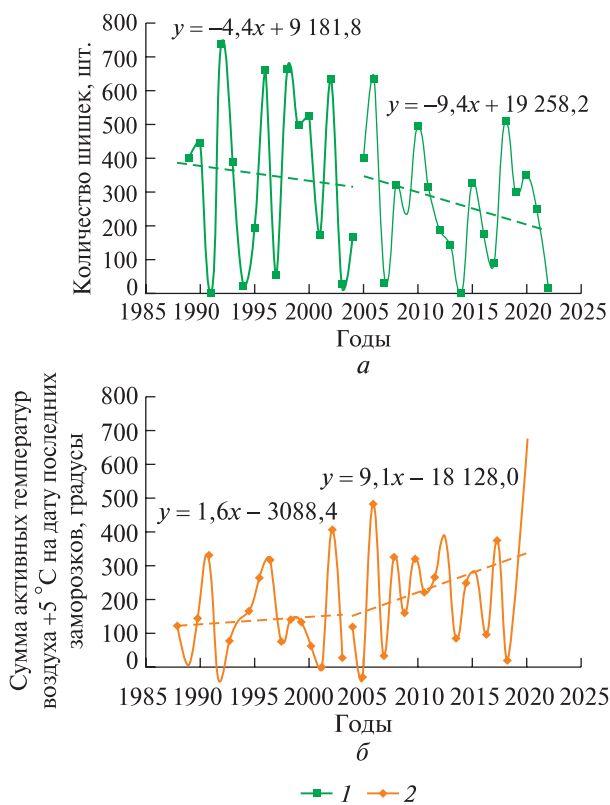


Рис. 6. Динамика урожая шишек (а) и изменение суммы активных температур $+5^{\circ}\text{C}$ (б), накопленной на дату последних весенне-летних заморозков, за периоды 1990–2005 гг. и 2006–2023 гг. (штриховой линией показаны линии тренда изменения признаков): 1 — урожай шишек; 2 — сумма активных температур воздуха выше $+5^{\circ}\text{C}$ на дату последних весенне-летних заморозков

Fig. 6. Dynamics of cone yield (а) and changes in the sum of active temperatures $+5^{\circ}\text{C}$ (б) accumulated on the date of the last spring-summer frosts for the periods 1990–2005 and 2006–2023 (the dashed line shows the trend lines of changes in characteristics): 1 — cone yield; 2 — the sum of active temperatures above $+5^{\circ}\text{C}$ on the date of the last spring-summer frosts

Из этого следует, что в условиях наблюдаемых климатических изменений более значимым фактором весеннего развития репродуктивных структур является температура воздуха в апреле.

Без ответа остался один вопрос: изменяется ли соотношение наблюдаемой глобальной температуры воздуха и весенних заморозков? Если да, то каким образом?

Большинство исследователей склоняется к мнению о том, что потепление климата в мировом масштабе будет продолжаться и далее [33]. В связи с этим предполагаются различные сценарии развития событий — от относительно мягких, например RCP4.5, согласно которым температура к концу XXI в. вырастет не более чем на $1,8^{\circ}\text{C}$, до более драматических, например RCP8.5, в соответствии с которыми температура воздуха на планете вырастет более чем на $3,7^{\circ}\text{C}$ [34].

Большинство прогнозов для территории юга Сибири также указывает на рост температуры на $0,4 \dots 0,8^{\circ}\text{C}$ за десятилетие [35, 36].

Есть, однако, мнение, что в глобальном потеплении возникла пауза и что в ближайшие два десятилетия в Северном полушарии ожидается замедление темпов прироста температуры приземного воздуха [37]. На данный момент существуют разные точки зрения относительно будущего климата и в этом направлении продолжают исследования. Тем не менее согласно официальной сводке по Сибирскому федеральному округу [36], климат региона теплеет и сохранение этой тенденции прогнозируется на ближайшие десятилетия.

Рост температуры сопровождается увеличением частоты, длительности и интенсивности погодных аномалий [35]. Это во многом обусловлено участвовавшей сменой противоположных по характеру процессов — блокирующих и циркуляционных [38–43], это означает быструю смену погодных условий в регионах, расположенных на пути вторжения холодных арктических масс и, как следствие, повторяемости метеорологических экстремумов и связанных с ними заморозков [42]. В Западной Сибири дополнительным фактором, способствующим быстрому и беспрепятственному передвижению воздушных масс, является равнинный рельеф. Проникновение теплого воздуха из Казахстана провоцирует раннюю весну, а вторжение арктических воздушных масс на юг региона в начале вегетации приводит к заморозкам, которые являются самым опасным метеоявлением [44, 45].

Прогнозы относительно того, как изменятся сроки весенних заморозков при дальнейшем потеплении климата, противоречивы и, очевидно, наука находится на этапе сбора информации по этому вопросу [46, 47]. Большинство исследователей отмечает, что потепление уже привело к увеличению общей длительности безморозного периода за счет ранней весны и более позднего наступления осени и эта тенденция сохранится в будущем [13, 48, 49]. Повышение весенних значений температуры воздуха значительно ускорило начало вегетации растений и сдвинуло сроки цветения на более ранние даты, при этом весенние заморозки остались в прежних временных рамках [50–52]. Часть исследователей прогнозирует продолжение этой тенденции в течение всего XXI в. [18, 52, 53]. Поэтому ожидается, что повреждаемость растений заморозками остается на прежнем уровне [14, 51, 54, 55].

Есть противоположное мнение о том, что в будущем возможен сдвиг поздних весенних заморозков на более ранние сроки [13, 56]. Например, из исторических источников известно, что сроки

и длительность заморозков синхронизованы с «внутривековыми» циклами летних температур воздуха. Так, согласно летописям сельскохозяйственного освоения Сибири XVII–XIX вв., в периоды, когда были зафиксированы волны похолодания (1630–1840 гг.), поздние заморозки на юге Сибири происходили даже в начале июля [57], т. е. на месяц позднее, чем в XX в. Исходя из этого, можно предположить, что при «мягких» сценариях изменения климата, которые предполагают незначительное потепление или даже паузу в нем, теоретически возможна синхронизация заморозков с общим температурным режимом в весенние месяцы.

Для юга Западной Сибири — региона данных наблюдений, прогнозируется дальнейшее увеличение длительности безморозного периода благодаря росту температуры весной и позднему наступлению осени [21, 22, 30, 41]. Что касается изменения частоты весенних заморозков в связи с потеплением климата, то мнения исследователей не всегда совпадают, что, по-видимому, обусловлено разными методами учета заморозков, условиями районов исследования и хронологией метеоданных. Например, локальные очаги радиационных заморозков часто значительно удалены от ближайшей метеостанции и не фиксируются, при этом радиационные заморозки случаются чаще, чем адвективные и наблюдаются гораздо позже весной [58].

Судя по полученным нами результатам (см. рис. 5), в некоторые годы неурожай шишек мог быть обусловлен влиянием именно радиационных заморозков. Например, в 2001 г. на момент последних заморозков, зафиксированных местной метеостанцией, САТ составила всего 87 градусов, однако средний урожай шишек оказался небольшим — 166 шт./с одного дерева. В 2004 г. наблюдалась аналогичная ситуация: САТ на момент заморозков составила 58 градусов, а средний урожай — 173 шишки с одного дерева. Тем не менее бесспорным остается факт наступления самых поздних заморозков по-прежнему в первой половине июня [21, 22, 30, 31, 41, 59]. Вероятность их появления сохраняется на уровне 2...10 % [21, 31, 59].

На первый взгляд складывается парадоксальная ситуация: климат теплеет, начало весеннего развития живой природы сдвигается на более ранние сроки, а заморозки как элемент климатической системы а priori должны также сдвинуться на более ранние сроки. Тогда бы их негативное влияние на растения осталось прежним. Однако наблюдения показывают неожиданный результат: даты заморозков не только не сдвигаются на более ранние сроки, но становятся даже более поздними (см. рис. 3, 4),

а значит, более разрушительными для растений. С одной стороны, результаты получены нами с помощью анализа достаточно коротких (с климатической точки зрения) рядов метеоданных и дальнейшие наблюдения могут выявить изменение наблюдаемых тенденций. С другой — возможно, что в настоящее время происходит локальная и кратковременная «рассинхронизация» глобальной температуры воздуха и заморозков. Предположительно, в будущем даты поздних весенних заморозков сдвинутся на более ранние сроки, поскольку при любых климатических изменениях должна доминировать синхронизация [39].

Повышение температуры воздуха весной ускоряет начало вегетации — эти процессы не всегда параллельны [47, 52] — поэтому изменения взаимосвязи между сроками весенней фенологии и температурой используются как индикатор экологических последствий от заморозков, обусловленных потеплением климата [60].

Прогнозы реакции растений на заморозки могут различаться и географически: заморозки могут наступать чаще в одних районах и реже — в других [54]. Важно также учитывать видовую специфику фенологических реакций на потепление. Например, виды с температурной стимуляцией начала весеннего развития [61], по сравнению с фотопериодической [62], сильнее подвергаются негативному действию асинхронности заморозков и весенней температуры. Некоторые древесные виды, произрастающие в условиях умеренного климата, минимизируют риск попадания под заморозки благодаря задержке начала весеннего развития [52] вследствие снижения температурной чувствительности. Теплые зимы способствуют меньшему зимнему охлаждению, вызывая ослабление реакции деревьев на раннее наступление весеннего тепла. Мягкие зимы обеспечивают «правильную» реакцию растений на весеннее тепло, поэтому выход почек из состояния покоя задерживается и все фенофазы происходят позднее, когда минует угроза заморозков. Именно уменьшение экстремально низких температур зимой дает основание рассматривать изменяющийся климат не как все более жаркий, а как менее холодный [49]. В сложившейся ситуации предполагается два сценария. С одной стороны, дальнейшее потепление может передвинуть начало цветения растений на более поздние сроки, не вызывая изменения или даже незначительно снижая риск весенних заморозков [52, 63, 64]. С другой — по причине потепления начало цветения растений может сместиться на более ранние сроки, что увеличит риск их повреждения весенними заморозками [63, 65].

Для кедра сибирского, по нашему мнению, реалистичен второй сценарий. Согласно полученным нами данным, изменение характера цикличности плодоношения обусловлено сопряженным действием двух основных метеопараметров:

1) стремительным ростом температуры воздуха в апреле в год опыления, вызывающим быстрое накопление САТ;

2) относительным «запаздыванием» поздних весенних заморозков. На фоне активного роста температуры воздуха заморозки остаются в прежних временных границах. Эта асинхронность привела к тому, что заморозки стали застигать развивающиеся шишки на более поздних, а потому более уязвимых, этапах развития. Учитывая, что необходимым условием для созревания высокого урожая кедра сибирского является либо отсутствие поздних весенних заморозков, либо они должны произойти при небольшом значении САТ, наблюдаемая климатическая тенденция вряд ли будет способствовать формированию высоких урожаев. По-видимому, ситуация может измениться к лучшему лишь при стабилизации климата, которая может «синхронизировать» заморозки с общим температурным режимом в весенние месяцы.

Выводы

За период 2000–2020 гг. среднемноголетнее созревание шишек снизилось почти на 25 % относительно уровня, который был при стабильных климатических условиях. Изменился объем урожаев шишек: характерное для прежнего климата чередование высоких и низких урожаев сменилось чередованием средних и низких. Итоговый урожай шишек стал зависеть преимущественно от весенней погоды в год опыления и отрицательно коррелирует с САТ выше +5 °С, накопленной до наступления поздних весенних заморозков. В годы, когда поздние весенние заморозки случались при небольшом значении САТ (менее 100 градусов), урожай шишек был высоким. Напротив, когда перед заморозками накапливалась большая САТ, урожай шишек был минимальным. Несмотря на рост теплообеспеченности в весенний период вследствие активного «прироста» температуры воздуха в апреле, ожидаемого сдвига заморозков на более ранние сроки на юге Западной Сибири не наблюдается. Для кедра сибирского такая ситуация чревата усилением негативных тенденций в динамике плодоношения. Предполагается, что при дальнейшем потеплении климата начало весеннего развития репродуктивных структур будет происходить в более ранние сроки, поэтому репродуктивные структуры будут сильнее повреждаться поздними весенними заморозками, поскольку последние остаются в прежних временных рамках. Обильные урожаи

шишек кедра сибирского смогут формироваться лишь в отдельные годы с поздним наступлением весны и/или при отсутствии поздних весенних заморозков.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, грант № 23-26-00080.

Список литературы

- [1] Pearse I.S., Koenig W.D., Kelly D. Mechanisms of mast seeding: resources, weather, cues, and selection // *New Phytologist*, 2016, v. 212, iss. 3, pp. 546–562. DOI: 10.1111/nph.14114
- [2] Pearse I.S., LaMontagne J.M., Koenig W.D. Inter-annual variation in seed production has increased over time (1900–2014) // *Proceedings of the Royal Society B*, 2017, v. 284, at. 20171666. DOI: 10.1098/rspb.2017.1666
- [3] Bogdziewicz M., Kelly D., Thomas P.A., Lagueard J.G.A., Hackett-Pain A. Climate warming disrupts mast seeding and its fitness benefits in European beech // *Nature Plants*, 2020, v. 6, pp. 88–94. DOI: 10.1038/s41477-020-0592-8
- [4] Crone E.E., Miller E., Sala A. How do plants know when other plants are flowering? Resource depletion, pollen limitation and mast-seeding in a perennial wildflower // *Ecology letters*, 2009, v. 12, pp. 1119–1126. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2009.01365.x
- [5] Bisi F., von Hardenberg J., Bertolino S., Wauters L.A., Imperio S., Preatoni D.G., Provenzale A., Mazzamuto M.V., Martinoli A. Current and future conifer seed production in the Alps: testing weather factors as cues behind masting // *European J. of Forest Research*, 2016, v. 135, pp. 743–754. DOI: 10.1007/s10342-016-0969-4
- [6] Zamorano J.G., Hokkanen T., Lehtikoinen A. Climate-driven synchrony in seed production of masting deciduous and conifer tree species // *J. of Plant Ecology*, 2016, v. 11, no. 2, pp. 180–188. DOI: 10.1093/jpe/rtw117
- [7] Owens J.N. Flowering and seed set // *Physiology of trees*. New York: John Wiley, 1991, pp. 247–273.
- [8] Некрасова Т.П. Пыльца и пыльцевой режим хвойных Сибири. Новосибирск: Наука, 1983. 169 с.
- [9] Третьякова И.Н. Эмбриология хвойных: физиологические аспекты. Новосибирск: Наука, 1990. 157 с.
- [10] Bazhina E.V., Kvitko O.V., Muratova E.N. Specific features of meiosis in the Siberian fir (*Abies sibirica*) in the forest Arboretum of the V.N. Sukachev Institute, Russia // *Biodiversity and Conservation*, 2011, v. 20, no. 2, pp. 415–428. DOI: 10.1007/s10531-010-9958-y
- [11] Goryachkina O.V., Muratova E.N. Meiosis at microsporangogenesis in Gmelin larch (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) at the V.N. Sukachev Institute of Forest Arboretum // *The International J. of Plant Reproductive Biology*, 2016, v. 8, no. 2, pp. 139–144.
- [12] Носкова Н.Е., Третьякова И.Н., Муратова Е.Н. Микроспорогенез и формирование пыльцы у сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях современного климата Сибири // *Известия Российской академии наук. Серия биологическая*, 2009. № 3. С. 379–384.
- [13] Omazić B., Anić M., Prtenjak M.T., Kvakić M., Blašković L. Analysis of different existing measurement-based methods and a new approach for frost probability detection // *Agricultural and Forest Meteorology*, 2024, v. 347, at. 109898. DOI: 10.1016/j.agrformet.2024.109898
- [14] Gu L., Hanson P., Mac Post W., Kaiser D., Yang B., Nemani R., Pallardy S., Meyers T. The 2007 eastern US spring freezes: Increased cold damage in a warming world? // *Bioscience*, 2008, v. 58, pp. 253–262. DOI: 10.1641/B580311

- [15] Vitasse Y., Rebetez M. Unprecedented risk of spring frost damage in Switzerland and Germany in 2017 // *Climatic Change*, 2018, v. 149, pp. 233–246. DOI: 10.1007/S10584-018-2234-Y
- [16] Lamichhane J.R. Rising risks of late-spring frosts in a changing climate // *Nature Climate Change*, 2021, v. 11, pp. 554–555. DOI: 10.1038/s41558-021-01090-x
- [17] Rigby J.R., Porporato A. Spring frost risk in a changing climate // *Geophysical Research Letters*, 2008, v. 35, iss. 12, at. 12703. DOI: 10.1029/2008GL033955
- [18] Augspurger C.K. Reconstructing patterns of temperature, phenology, and frost damage over 124 years: spring damage risk is increasing // *Ecology*, 2013, v. 94, iss. 1, pp. 41–50. DOI: 10.1890/12-0200.1
- [19] Erlat E., Türkes M. Analysis of observed variability and trends in numbers of frost days in Turkey for the period 1950–2010 // *International J. of Climatology*, 2012, v. 32, iss. 12, pp. 1889–1898. DOI: 10.1002/JOC.2403
- [20] Graczyk D., Szwed M. Changes in the occurrence of late spring frost in Poland // *Agronomy*, 2020, v. 10, iss. 11, at. 1835. DOI: 10.3390/AGRONOMY10111835
- [21] Волкова Е.С., Мельник М.А. Заморозки в южной тайге Западной Сибири как фактор риска для сферы растениеводства // *География и природные ресурсы*, 2023. № 1. С. 67–75. DOI: 10.15372/GIPR20230108
- [22] Чердык Н.Н., Кузевская И.В., Волкова М.А., Горбатенко В.П., Нечепуренко О.Е., Носырева О.В., Чурсин В.В. Оценка изменения характеристик заморозков для агрозоны юга Сибири в период потепления // XV Сибирское совещ. и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу: Материалы Всерос. конф. с междунар. участием, Томск, 17–20 октября 2023 г. Томск: б. и., 2023. С. 113–115.
- [23] Танцырев Н.В., Санников С.Н. Анализ консортивных связей между кедром сибирским и кедровкой на Северном Урале // *Экология*, 2011. № 1. С. 20–24.
- [24] Некрасова Т.П. Биологические основы семеношения кедра сибирского. Новосибирск: Наука, 1972. 276 с.
- [25] Ирошников А.И. Полиморфизм популяций кедра сибирского // *Изменчивость древесных растений Сибири*. Красноярск: Институт леса и древесины им. В.Н. Сукачева, 1974. С. 77–103.
- [26] Воробьев В.Н., Воробьева Н.А., Горошкевич С.Н. Рост и пол кедра сибирского. Новосибирск: Наука, 1989. 167 с.
- [27] Goroshkevich S., Velisevich S., Popov A., Khutornoy O., Vasilyeva G. 30-year cone production dynamics in Siberian stone pine (*Pinus sibirica*) in the southern boreal zone: a causal interpretation // *Plant Ecology and Evolution*, 2021, v. 154, no. 3, pp. 321–331. DOI: 10.5091/plecevo.eu/issue/3728
- [28] Горошкевич С.Н. Пространственно-временная и структурно-функциональная организация кроны кедра сибирского: дис. ... д-ра биол. наук: 03.02.01. Томск, 2011. 611 с.
- [29] Харюткина Е.В., Логинов С.В., Ипполитов И.И. Роль радиационных и циркуляционных факторов в изменении климата Западной Сибири в конце XX и начале XXI веков // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*, 2016. Т. 52. № 6. С. 651–659.
- [30] Воронина Л.В., Зарубина А.В. Исследование заморозков как экологически опасных явлений // *Вестник СГУИТ*, 2010. № 13–2. С. 107–112.
- [31] Носырева О.В., Кошикова Т.С. Повторяемость заморозков в Западной Сибири // XII Сибирское совещ. и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу: Материалы Всерос. науч. конф., Томск, 17–20 октября 2017 г. Томск: Офсет-центр, 2017. С. 72–73.
- [32] Грингоф И.Г., Пасечнюк А.Д. Агрометеорология и агрометеорологические наблюдения. СПб.: Гидрометеоздат, 2005. 552 с.
- [33] AR6 Synthesis Report Climate Change 2023. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/> (дата обращения 14.03.2024).
- [34] AR4 Climate Change 2007: Synthesis Report. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/> (дата обращения 14.03.2024)
- [35] Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2017 год. Москва: Росгидромет, 2018. 70 с. URL: https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download/o-klimat-rf-2018.pdf (дата обращения 14.02.23)
- [36] Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Санкт-Петербург: Росгидромет, 2022. 676 с. URL: <https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2022/od3.pdf> (дата обращения 18.03.2024)
- [37] Шерстюков Б.Г. Физико-статистическое моделирование колебаний климата и опыт прогноза на два десятилетия колебаний температуры воздуха Северного полушария // *Труды ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»*, 2018. № 18. С. 29–49.
- [38] Мохов И.И., Акперов М.Г., Прокофьева М.А., Тимажев А.В., Лупо А.Р., Ле Трет Э. Блокинг в Северном полушарии и Евро-Атлантическом регионе: оценки изменений по данным реанализа и модельным расчетам // *Доклады Академии наук*, 2013. Т. 449. № 5. С. 1–5. DOI: 10.7868/S0869565213110224
- [39] Переведенцев Ю.П., Мохов И.И., Елисеев А.В., Шанталинский К.М., Важнова Н.А. Теория общей циркуляции атмосферы. Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2013. 224 с.
- [40] Kharyutkina E.V., Loginov S.V., Martynova Y.V. Variability of atmospheric circulation under climate change in West Siberia in the late 20th – early 21st centuries // *Russian Meteorology and Hydrology*, 2016, v. 41, no. 6, pp. 435–438. DOI: 10.3103/S106837391606008X
- [41] Барашкова Н.К., Кузевская И.В., Носырева О.В. Климатические характеристики режимов устойчивого перехода температуры воздуха через определенные пределы на юге Западной Сибири // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*, 2015. № 1. С. 87–97. DOI: 10.15356/0373-2444-2015-1-87-97
- [42] Кононова Н.К., Черенкова Е.А. Повторяемость элементарных циркуляционных механизмов в атмосфере Северного полушария // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*, 2018. № 6. С. 17–25. DOI: 10.1134/S2587556618060080
- [43] Харюткина Е.В., Логинов С.В., Морару Е.И., Пустовалов К.Н., Мартынова Ю.В. Динамика характеристик экстремальности климата и тенденции опасных метеорологических явлений на территории Западной Сибири // *Оптика атмосферы и океана*, 2022. Т. 35. № 2. С. 136–142. DOI: 10.15372/AOO20220208
- [44] Евсеева Н.С., Ромашова Т.В. Опасные метеорологические явления как составная часть природного риска (на примере юга Томской области) // *Вестник Томского государственного университета*, 2011. № 353. С. 199–204.
- [45] Волкова М.А., Чердык Н.Н., Ивашкова О.А. Особенности формирования и социально-экономические последствия температурных рисков в Томской области // *Вестник Томского государственного университета*, 2013. № 374. С. 180–187.
- [46] Vitasse Y., Lenz A., Körner C. The interaction between freezing tolerance and phenology in temperate deciduous trees // *Frontiers in Plant Science*, 2014, v. 5, at. 541. DOI: 10.3389/fpls.2014.00541

- [47] Ma Q., Huang J.G., Hänninen H., Berninger F. Divergent trends in the risk of spring frost damage to trees in Europe with recent warming // *Global Change Biology*, 2019, v. 25, iss. 1, pp. 351–360. DOI: 10.1111/GCB.14479
- [48] Menzel A. Trends in phenological phases in Europe between 1951 and 1996 // *International J. of Biometeorology*, 2000, v. 44, pp. 76–81. DOI: 10.1007/s004840000054
- [49] Alexander L.V., Zhang X., Peterson T.C., Caesar J., Gleason B., Klein Tank A.M.G., Haylock M., Collins D., Trewin B., Rahimzadeh F., Tagipour A., Rupa Kumar K., Revadekar J., Griffiths G., Vincent L., Stephenson D.B., Burn J., Aguilar E., Brunet M., Taylor M., New M., Zhai P., Rusticucci M., Vazquez-Aguirre J.L. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation // *J. of Geophysical Research*, 2006, v. 111, at. 5109. DOI: 10.1029/2005JD006290
- [50] Vitasse Y., Francois C., Delpierre N., Dufrêne E., Kremer A., Chuine I., Delzon S. Assessing the effects of climate change on the phenology of European temperate trees // *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, v. 151, pp. 969–980. DOI: 10.1016/j.agrformet.2011.03.003
- [51] Hoffmann H., Rath T. Future Bloom and Blossom Frost Risk for *Malus domestica* Considering Climate Model and Impact Model Uncertainties // *PLOS ONE*, 2013, v. 8, iss. 10, at. 75033. DOI: 10.1371/journal.pone.0075033
- [52] Fu Y.H., Zhao H., Piao S., Peaucelle M., Peng S., Zhou, G., Ciais P., Huang M., Menzel A., Peñuelas J., Song Y., Vitasse Y., Zeng Z., Janssens I.A. Declining global warming effects on the phenology of spring leaf unfolding // *Nature*, 2015, v. 526, pp. 104–107. DOI: 10.1038/nature15402
- [53] Unterberger C., Brunner L., Nabernegg S., Steininger K.W., Steiner A.K., Stabentheiner E., Monschein S., Truhetz H. Spring frost risk for regional apple production under a warmer climate // *PLOS ONE*, 2018, v. 13, iss. 7, at. 0200201. DOI: 10.1371/journal.pone.0200201
- [54] Inouye D.W. The ecological and evolutionary significance of frost in the context of climate change // *Ecology Letters*, 2000, v. 3, pp. 457–463. DOI: 10.1046/j.1461-0248.2000.00165.x
- [55] Chuine I., Bonhomme M., Legave J.-M., Garcia de Cortazar-Atauri I., Charrier G., Lacoïnte A., Ameglio T. Can phenological models predict tree phenology accurately in the future? The unrevealed hurdle of endodormancy break // *Global Change Biology*, 2016, v. 22, pp. 3444–3460. DOI: 10.1111/gcb.13383
- [56] Zohner C.M., Mo L., Renner S.S., Svenning J.-C., Vitasse Y., Benito B.M., Ordonez A., Baumgarten F., Bastin J.-F., Sebald V., Reich P.B., Liang J., Nabuurs G.-J., Brändli U.-B., Cienciala E., Crowther T.W., Kepfer-Rojas S., Saikia P., Gianelle D., Fernández C.A., Korjus H. Late-spring frost risk between 1959 and 2017 decreased in North America but increased in Europe and Asia // *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, v. 117, pp. 12192–12200. DOI: 10.1073/pnas.1920816117
- [57] Мыглан В.С. Климат и социум Сибири в малый ледниковый период. Красноярск: Изд-во Сибирского федерального университета, 2010. 230 с.
- [58] Волкова Е.С., Мельник М.А. Специфика критериев опасных и неблагоприятных природно-климатических явлений для сферы аграрного природопользования южной тайги Западной Сибири // *Проблемы региональной экологии*, 2016. № 5. С. 70–75.
- [59] Кижнер Л.И. Экономические аспекты обеспечения метеорологической информацией о заморозках в Томской области // *Вестник Томского государственного университета*, 2014. № 381. С. 232–237.
- [60] Keenan T.F. Phenology: Spring greening in a warming world // *Nature*, 2015, v. 526, pp. 48–49. DOI: 10.1038/nature15633
- [61] Hufkens K., Friedl M.A., Keenan T.F., Sonnentag O., Bailey A., O'keefe J., Richardson A.D. Ecological impacts of a widespread frost event following early spring leaf-out // *Global Change Biology*, 2012, v. 18, pp. 2365–2377. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2012.02712.x
- [62] Zohner C.M., Renner S.S. Perception of photoperiod in individual buds of mature trees regulates leaf-out // *New Phytologist*, 2015, v. 208, pp. 1023–1030. DOI: 10.1111/nph.13510
- [63] Eccel E., Rea R., Caffarra A., Crisci A. Risk of spring frost to apple production under future climate scenarios: the role of phenological acclimation // *International J. of Biometeorology*, 2009, v. 53, pp. 273–286. DOI: 10.1007/s00484-009-0213-8
- [64] Vitasse Y., Schneider L., Rixen C., Christen D., Rebetez M. Increase in the risk of exposure of forest and fruit trees to spring frosts at higher elevations in Switzerland over the last four decades // *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, v. 248, pp. 60–69. DOI: 10.1016/j.agrformet.2017.09.005
- [65] Sgubin G., Swingedouw D., Dayon G., Garcia de Cortazar-Atauri I., Ollat N., Page C., van Leeuwen C. The risk of tardive frost damage in French vineyards in a changing climate // *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, v. 250–251, pp. 226–242. DOI: 10.1016/j.agrformet.2017.12.253

Сведения об авторах

Велисевич Светлана Николаевна — канд. биол. наук, ст. науч. сотр., ФГБУН «Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук» (ИМКЭС СО РАН), s_n_velisevich@mail.ru

Попов Александр Владимирович — инженер 1 категории, ФГБУН «Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук» (ИМКЭС СО РАН), tomskceltic@gmail.com

Мельник Мария Алексеевна — канд. геогр. наук, науч. сотр., ФГБУН «Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук» (ИМКЭС СО РАН), melnik-m-a@yandex.ru

Горошкевич Сергей Николаевич — д-р биол. наук, гл. науч. сотр., ФГБУН «Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук» (ИМКЭС СО РАН), pearldiver@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.05.2024.

Одобрено после рецензирования 15.07.2024.

Принята к публикации 22.08.2024.

INFLUENCE OF LATE SPRING LIGHT FROSTS ON SIBERIAN STONE PINE (*PINUS SIBIRICA* DU TOUR) SEED PRODUCTION IN CHANGING CLIMATE

S.N. Velisevich, A.V. Popov✉, M.A. Mel'nik, S.N. Goroshkevich

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 10/3, Academicheskyy av., 634055, Tomsk, Russia

tomskceltic@gmail.com

The dynamics of Siberian stone pine cone bearing for the period from 1990 to 2023 has been considered to establish the influence of weather conditions in the spring period during the pollination year on the subsequent cone crop. It has been found that over the past two decades, the average annual level of the mature cones number has decreased by almost a quarter of the level that was at stable climate. The amplitude of fluctuations in cone crops has also changed, as the alternation of high and low yields characteristic of the previous climate was replaced by an alternation of medium and low ones. It has been suggested that one of the reasons for a negative trend in the seeding dynamics is late spring frosts, which remained within the same time frame despite climate warming. The number of mature cones in the crown largely depended on the spring weather in the pollination year and negatively correlated with the sum of active temperatures above +5°C accumulated before the onset of late spring frost. The value of this indicator was determined by the April temperature. In years when late spring frost occurred at low active temperatures (less than 100 °C), the cone crop was large. In contrast, when 300 °C or more accumulated before freezing, cone crop was minimal. Changes in the timing of the last spring-summer frosts were also noted; on average, there is a tendency for the timing of the last frosts to shift to later dates. It is assumed that with further climate warming, the onset of spring development of reproductive structures will occur at an earlier date, therefore reproductive structures will be more damaged by late spring frosts, since the latter remain within the same time frame. Abundant crops of Siberian stone pine can be formed only in some years with late spring and/or in the absence of late spring frosts.

Keywords: Siberian stone pine, *Pinus sibirica* Du Tour, seed production, climate, spring frosts

Suggested citation: Velisevich S.N., Popov A.V., Mel'nik M.A., Goroshkevich S.N. *Vliyaniye pozdnykh vesennykh zamorozkov na plodonosheniye kedra sibirskogo (Pinus sibirica Du Tour) v izmenyayushchemsya klimate* [Influence of late spring light frosts on Siberian stone pine (*Pinus sibirica* Du Tour) seed production in changing climate]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 5, pp. 138–152. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-138-152

References

- [1] Pearse I.S., Koenig W.D., Kelly D. Mechanisms of mast seeding: resources, weather, cues, and selection. *New Phytologist*, 2016, v. 212, iss. 3, pp. 546–562. DOI: 10.1111/nph.14114
- [2] Pearse I.S., LaMontagne J.M., Koenig W.D. Inter-annual variation in seed production has increased over time (1900–2014). *Proceedings of the Royal Society B*, 2017, v. 284, at. 20171666. DOI: 10.1098/rspb.2017.1666
- [3] Bogdziewicz M., Kelly D., Thomas P.A., Lageard J.G.A., Hackett-Pain A. Climate warming disrupts mast seeding and its fitness benefits in European beech. *Nature Plants*, 2020, v. 6, pp. 88–94. DOI: 10.1038/s41477-020-0592-8
- [4] Crone E.E., Miller E., Sala A. How do plants know when other plants are flowering? Resource depletion, pollen limitation and mast-seeding in a perennial wildflower. *Ecology letters*, 2009, v. 12, pp. 1119–1126. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2009.01365.x
- [5] Bisi F., von Hardenberg J., Bertolino S., Wauters L.A., Imperio S., Preatoni D.G., Provenzale A., Mazzamuto M.V., Martinoli A. Current and future conifer seed production in the Alps: testing weather factors as cues behind masting. *European J. of Forest Research*, 2016, v. 135, pp. 743–754. DOI: 10.1007/s10342-016-0969-4
- [6] Zamorano J.G., Hokkanen T., Lehtikoinen A. Climate-driven synchrony in seed production of masting deciduous and conifer tree species. *J. of Plant Ecology*, 2016, v. 11, no. 2, pp. 180–188. DOI: 10.1093/jpe/rtw117
- [7] Owens J.N. Flowering and seed set. *Physiology of trees*. New York: John Wiley, 1991, pp. 247–273.
- [8] Nekrasova T.P. *Pyl'tsa i pyl'tsevoy rezhim khvoynykh Sibiri* [Pollen and pollen regime of Siberian conifers]. Novosibirsk: Nauka, 1983, 169 p.
- [9] Tret'yakova I.N. *Embriologiya khvoynykh: fiziologicheskie aspekty* [Embryology of conifers: physiological aspects]. Novosibirsk: Nauka, 1990, 157 p.
- [10] Bazhina E.V., Kvitko O.V., Muratova E.N. Specific features of meiosis in the Siberian fir (*Abies sibirica*) in the forest Arboretum of the V.N. Sukachev Institute, Russia. *Biodiversity and Conservation*, 2011, v. 20, no. 2, pp. 415–428. DOI: 10.1007/s10531-010-9958-y
- [11] Goryachkina O.V., Muratova E.N. Meiosis at microsporogenesis in Gmelin larch (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) at the V.N. Sukachev Institute of Forest Arboretum. *The International J. of Plant Reproductive Biology*, 2016, v. 8, n. 2, pp. 139–144.
- [12] Noskova N.E., Tret'yakova I.N., Muratova E.N. *Mikrosporogenez i formirovaniye pyl'tsy u sosny obyknovnoy (Pinus sylvestris L.) v usloviyakh sovremennoy klimata Sibiri* [Microsporogenesis and pollen formation in Scotch pine (*Pinus sylvestris* L.) under modern climatic conditions of Siberia]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya biologicheskaya* [Biology Bulletin of the Russian Academy of Sciences], 2009, no. 3, pp. 379–384.
- [13] Omazić B., Anić M., Prtenjak M.T., Kvakić M., Blašković L. Analysis of different existing measurement-based methods and a new approach for frost probability detection. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2024, v. 347, at. 109898. DOI: 10.1016/j.agrformet.2024.109898

- [14] Gu L., Hanson P., Mac Post W., Kaiser D., Yang B., Nemani R., Pallardy S., Meyers T. The 2007 eastern US spring freezes: Increased cold damage in a warming world? *Bioscience*, 2008, v. 58, pp. 253–262. DOI: 10.1641/B580311
- [15] Vitasse Y., Rebetez M. Unprecedented risk of spring frost damage in Switzerland and Germany in 2017. *Climatic Change*, 2018, v. 149, pp. 233–246. DOI: 10.1007/S10584-018-2234-Y
- [16] Lamichhane J.R. Rising risks of late-spring frosts in a changing climate. *Nature Climate Change*, 2021, v. 11, pp. 554–555. DOI: 10.1038/s41558-021-01090-x
- [17] Rigby J.R., Porporato A. Spring frost risk in a changing climate. *Geophysical Research Letters*, 2008, v. 35, iss. 12, at. 12703. DOI: 10.1029/2008GL033955
- [18] Augspurger C.K. Reconstructing patterns of temperature, phenology, and frost damage over 124 years: spring damage risk is increasing. *Ecology*, 2013, v. 94, iss. 1, pp. 41–50. DOI: 10.1890/12-0200.1
- [19] Erlat E., Türkes M. Analysis of observed variability and trends in numbers of frost days in Turkey for the period 1950–2010. *International J. of Climatology*, 2012, v. 32, iss. 12, pp. 1889–1898. DOI: 10.1002/JOC.2403
- [20] Graczyk D., Szwed M. Changes in the occurrence of late spring frost in Poland. *Agronomy*, 2020, v. 10, iss. 11, at. 1835. DOI: 10.3390/AGRONOMY10111835
- [21] Volkova E.S., Mel'nik M.A. *Zamorozki v yuzhnoy tayge Zapadnoy Sibiri kak faktor riska dlya sfery rasteniyevodstva* [Frosts in southern taiga of Western Siberia as a risk factor for plant production]. *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and Natural Resources], 2023, no. 1, pp. 67–75. DOI: 10.15372/GIPR20230108
- [22] Chered'ko N.N., Kuzhevskaya I.V., Volkova M.A., Gorbatenko V.P., Nechepurenko O.E., Nosyreva O.V., Chursin V.V. *Otsenka izmeneniya kharakteristik zamorozkov dlya agrozony yuga Sibiri v period potepleniya* [Assessment of changes in the characteristics of frosts for the agrozone of southern Siberia during the warming period]. XII Sibirskoe soveshchanie i shkola molodykh uchenykh po klimato-ekologicheskomu monitoringu: materialy Vseros. (s mezhdunar. uchastiem) nauch. konf. [XIIth Siberian Meeting and Young Scientists School on Climate and Environmental Monitoring: materials of Vseros. (with international participation) scientific. conf.]. Tomsk, October 17–20, 2023. Tomsk, 2023, pp. 72–73.
- [23] Tantsyrev N.V., Sannikov S.N. *Analiz konsortivnykh svyazey mezhdru kedrom sibirskim i kedrovkoy na Severnom Urale* [Analysis of consortive relationships between the Siberian stone pine and the nutcracker in the Northern Urals]. *Ekologiya* [Russian Journal of Ecology], 2011, no. 1, pp. 20–24.
- [24] Nekrasova T.P. *Biologicheskie osnovy semenosheniya kedra sibirskogo* [Biological basis of the Siberian cedar seed production]. Novosibirsk: Nauka, 1972, 276 p.
- [25] Iroshnikov A.I. *Polimorfizm populyatsiy kedra sibirskogo* [Polymorphism of Siberian Cedar Populations]. *Izmenchivost' drevesnykh rasteniy Sibiri* [Variability of Woody Plants of Siberia]. Krasnoyarsk: ILID SB AS USSR, 1974, pp. 77–103.
- [26] Vorob'ev V.N., Vorob'eva N.A., Goroshkevich S.N. *Rost i pol kedra sibirskogo* [Growth and gender of Siberian cedar]. Novosibirsk: Nauka, 1989, 167 p.
- [27] Goroshkevich S., Velisevich S., Popov A., Khutornoy O., Vasilyeva G. 30-year cone production dynamics in Siberian stone pine (*Pinus sibirica*) in the southern boreal zone: a causal interpretation. *Plant Ecology and Evolution*, 2021, v. 154, no. 3, pp. 321–331. DOI: 10.5091/plecevo.eu/issue/3728
- [28] Goroshkevich S.N. *Prostranstvenno-vremennaya i strukturno-funktional'naya organizatsiya krony kedra sibirskogo* [Spatio-temporal and structural-functional organization of the Siberian cedar crown]. Diss. Dr. Sci. (Biol.). 03.02.01. Tomsk, 2011, 611 p.
- [29] Kharyutkina E.V., Loginov S.V., Ippolitov I.I. *Rol' radiatsionnykh i tsirkulyatsionnykh faktorov v izmenenii klimata Zapadnoy Sibiri v kontse XX i nachale XXI vekov* [Influence of radiation and circulation factors on climate change in Western Siberia at the end of the 20th century and beginning of the 21st century]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana* [Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics], 2016, t. 52, no. 6, pp. 651–659.
- [30] Voronina L.V., Zarubina A.V. *Issledovanie zamorozkov kak ekologicheski opasnykh yavleniy* [Study of frosts as environmentally hazardous phenomena]. *Vestnik SGUGIT* [Vestnik SSUGT], 2010, no. 13–2, pp. 107–112.
- [31] Nosyreva O.V., Koshikova T.S. *Povtoryaemost' zamorozkov v Zapadnoy Sibiri* [Frost frequency in Western Siberia]. XII Sibirskoe soveshchanie i shkola molodykh uchenykh po klimato-ekologicheskomu monitoringu: Materialy Vseros. nauch. konf. [XIIth Siberian Meeting and Young Scientists School on Climate and Environmental Monitoring: materials of Vseros. scientific. conf.]. Tomsk, October 17–20, 2017. Tomsk: Ofset-tsentr, 2017, pp. 72–73.
- [32] Gringof I.G., Pasechnyuk A.D. *Agrometeorologiya i agrometeorologicheskie nablyudeniya* [Agrometeorology and agrometeorological observations]. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2005, 552 p.
- [33] AR6 Synthesis Report Climate Change 2023. Available at: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/> (accessed 14.03.2024).
- [34] AR4 Climate Change 2007: Synthesis Report. Available at: <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/> (accessed 14.03.2024)
- [35] *Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiyskoy Federatsii za 2017 god* [Report on climate features in the Russian Federation in 2017]. Moscow: Rosgidromet, 2018, 70 p. Available at: https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download/o-klimata-rf-2018.pdf (accessed 14.02.23)
- [36] *Tretiy otsenochnyy doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii* [Third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation]. St. Petersburg: Rosgidromet, 2022, 676 p. Available at: <https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2022/od3.pdf> (accessed 18.03.2024)
- [37] Sherstyukov B.G. *Fiziko-statisticheskoe modelirovanie kolebaniy klimata i opyt prognoza na dva desyatiletiya kolebaniy temperatury vozdukh Severnogo polushariya* [Physical-statistical modeling of climate variations and the experience in forecasting of air temperature variations in the Northern hemisphere for two decades]. *Trudy FGBU «VNIIGMI-MTsD»* [Proceedings of RIHMI-WDC], 2018, no. 18, pp. 29–49.
- [38] Mokhov I.I., Akperov M.G., Prokof'eva M.A., Timazhev A.V., Lupo A.R., Le Tret E. *Blokingi v Severnom polusharii i Evro-Atlanticheskoy regione: otsenki izmeneniy po dannym reanaliza i model'nym raschetam* [Blockings in the northern hemisphere and euro-atlantic region: estimates of changes from reanalysis data and model simulations]. *Doklady Akademii nauk* [Proceedings of the Academy of Sciences], 2013, t. 449, no. 5, pp. 1–5. DOI: 10.7868/S0869565213110224
- [39] Perevedentsev Yu.P., Mokhov I.I., Eliseev A.V., Shantalinsky K.M., Vazhnova N.A. *Teoriya obshchey tsirkulyatsii atmosfery* [Theory of general atmospheric circulation]. Ed. E.P. Naumov. Kazan: Kazan Federal University, 2013, 224 p.


- [40] Kharyutkina E.V., Loginov S.V., Martynova Y.V. Variability of atmospheric circulation under climate change in West Siberia in the late 20th – early 21st centuries. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2016, v. 41, no. 6, pp. 435–438. DOI: 10.3103/S106837391606008X
- [41] Barashkova N.K., Kuzhevskaya I.V., Nosyreva O.V. *Klimaticheskie kharakteristiki rezhimov ustoychivogo perekhoda temperatury vozdukhа cherez opredelennye predely na yuge Zapadnoy Sibiri* [Climatic characteristics of modes of the stable transition of air temperature through key bounds in the south of Western Siberia]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya geograficheskaya* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geography Series], 2015, no. 1, pp. 87–97. DOI: 10.15356/0373-2444-2015-1-87-97
- [42] Kononova N.K., Cherenkova E.A. *Povtoryaemost' elementarnykh tsirkulyatsionnykh mekhanizmov v atmosfere Severnogo polushariya* [Reiteration of the elementary circulation mechanisms in the atmosphere of the Northern hemisphere]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya geograficheskaya* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geography Series], 2018, no. 6, pp. 17–25. DOI: 10.1134/S2587556618060080
- [43] Kharyutkina E.V., Loginov S.V., Moraru E.I., Pustovalov K.N., Martynova Yu.V. *Dinamika kharakteristik ekstremal'nosti klimata i tendentsii opasnykh meteorologicheskikh yavleniy na territorii Zapadnoy Sibiri* [Dynamics of climate extremes and trends of dangerous meteorological phenomena in Western Siberia]. *Optika atmosfery i okeana* [Optika Atmosfery i Okeana], 2022, t. 35, no. 2, pp. 136–142. DOI: 10.15372/AOO20220208
- [44] Evseeva N.S., Romashova T.V. *Opasnye meteorologicheskie yavleniya kak sostavnaya chast' prirodnoy riska (na primere yuga Tomskoy oblasti)* [Dangerous meteorological phenomena as a constituent of natural risk (by example of the south of Tomsk region)]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Tomsk State University Journals], 2011, no. 353, pp. 199–204.
- [45] Volkova M.A., Chered'ko N.N., Ivashkova O.A. *Osobennosti formirovaniya i sotsial'no-ekonomicheskie posledstviya temperaturnykh riskov v Tomskoy oblasti* [Peculiarities of formation and social-economic consequences of temperature risks in Tomsk region]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Tomsk State University J.], 2013, no. 374, pp. 180–187.
- [46] Vitasse Y., Lenz A., Körner C. The interaction between freezing tolerance and phenology in temperate deciduous trees. *Frontiers in Plant Science*, 2014, v. 5, at. 541. DOI: 10.3389/fpls.2014.00541
- [47] Ma Q., Huang J.G., Hänninen H., Berninger F. Divergent trends in the risk of spring frost damage to trees in Europe with recent warming. *Global Change Biology*, 2019, v. 25, iss. 1, pp. 351–360. DOI: 10.1111/GCB.14479
- [48] Menzel A. Trends in phenological phases in Europe between 1951 and 1996. *International J. of Biometeorology*, 2000, v. 44, pp. 76–81. DOI: 10.1007/s004840000054
- [49] Alexander L.V., Zhang X., Peterson T.C., Caesar J., Gleason B., Klein Tank A.M.G., Haylock M., Collins D., Trewin B., Rahimzadeh F., Tagipour A., Rupa Kumar K., Revadekar J., Griffiths G., Vincent L., Stephenson D.B., Burn J., Aguilar E., Brunet M., Taylor M., New M., Zhai P., Rusticucci M., Vazquez-Aguirre J.L. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J. of Geophysical Research*, 2006, v. 111, at. 5109. DOI: 10.1029/2005JD006290
- [50] Vitasse Y., Francois C., Delpierre N., Dufrière E., Kremer A., Chuine I., Delzon S. Assessing the effects of climate change on the phenology of European temperate trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, v. 151, pp. 969–980. DOI: 10.1016/j.agrformet.2011.03.003
- [51] Hoffmann H., Rath T. Future Bloom and Blossom Frost Risk for Malus domestica Considering Climate Model and Impact Model Uncertainties. *PLOS ONE*, 2013, v. 8, iss. 10, at. 75033. DOI: 10.1371/journal.pone.0075033
- [52] Fu Y.H., Zhao H., Piao S., Peaucelle M., Peng S., Zhou, G., Ciais P., Huang M., Menzel A., Peñuelas J., Song Y., Vitasse Y., Zeng Z., Janssens I.A. Declining global warming effects on the phenology of spring leaf unfolding. *Nature*, 2015, v. 526, pp. 104–107. DOI: 10.1038/nature15402
- [53] Unterberger C., Brunner L., Naberneck S., Steininger K.W., Steiner A.K., Stabentheiner E., Monschein S., Truhetz H. Spring frost risk for regional apple production under a warmer climate. *PLOS ONE*, 2018, v. 13, iss. 7, at. 0200201. DOI: 10.1371/journal.pone.0200201
- [54] Inouye D.W. The ecological and evolutionary significance of frost in the context of climate change. *Ecology Letters*, 2000, v. 3, pp. 457–463. DOI: 10.1046/j.1461-0248.2000.00165.x
- [55] Chuine I., Bonhomme M., Legave J.-M., Garcia de Cortazar-Atauri I., Charrier G., Lacoite A., Ameglio T. Can phenological models predict tree phenology accurately in the future? The unrevealed hurdle of endodormancy break. *Global Change Biology*, 2016, v. 22, pp. 3444–3460. DOI: 10.1111/gcb.13383
- [56] Zohner C.M., Mo L., Renner S.S., Svenning J.-C., Vitasse Y., Benito B.M., Ordonez A., Baumgarten F., Bastin J.-F., Sebald V., Reich P.B., Liang J.; Nabuurs G.-J., Brändli U.-B., Cienciala E., Crowther T.W., Kepfer-Rojas S., Saikia P., Gianelle D., Fernández C.A., Korjus H. Late-spring frost risk between 1959 and 2017 decreased in North America but increased in Europe and Asia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, v. 117, pp. 12192–12200. DOI: 10.1073/pnas.1920816117
- [57] Myglan V.S. *Klimat i sotsium Sibiri v malye lednikovyy period* [The climate and society of Siberia during the Little Ice Age]. Krasnoyarsk: Sibirskiy Federal'nyy Universitet, 2010, 230 p.
- [58] Volkova E.S., Mel'nik M.A. *Spetsifika kriteriev opasnykh i neblagopriyatnykh prirodno-klimaticheskikh yavleniy dlya sfery agrarnogo prirodopol'zovaniya yuzhnoy taygi Zapadnoy Sibiri* [The specificity of the criteria of dangerous and adverse natural-climatic phenomena for the agricultural environmental management sphere in the southern taiga of Western Siberia]. *Problemy regional'noy ekologii* [Regional Environmental Issues], 2016, no. 5, pp. 70–75.
- [59] Kizhner L.I. *Ekonomicheskie aspekty obespecheniya meteorologicheskoy informatsiyey o zamorozkakh v Tomskoy oblasti* [The value of prognostic information for reduction of losses from frosts in Tomsk oblast]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Tomsk State University Journals], 2014, no. 381, pp. 232–237.
- [60] Keenan T.F. Phenology: Spring greening in a warming world. *Nature*, 2015, v. 526, pp. 48–49. DOI: 10.1038/nature15633
- [61] Hufkens K., Friedl M.A., Keenan T.F., Sonnentag O., Bailey A., O'keefe J., Richardson A.D. Ecological impacts of a widespread frost event following early spring leaf-out. *Global Change Biology*, 2012, v. 18, pp. 2365–2377. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2012.02712.x
- [62] Zohner C.M., Renner S.S. Perception of photoperiod in individual buds of mature trees regulates leaf-out. *New Phytologist*, 2015, v. 208, pp. 1023–1030. DOI: 10.1111/nph.13510

- [63] Eccel E., Rea R., Caffarra A., Crisci A. Risk of spring frost to apple production under future climate scenarios: the role of phenological acclimation. *International J. of Biometeorology*, 2009, v. 53, pp. 273–286. DOI: 10.1007/s00484-009-0213-8
- [64] Vitasse Y., Schneider L., Rixen C., Christen D., Rebetez M. Increase in the risk of exposure of forest and fruit trees to spring frosts at higher elevations in Switzerland over the last four decades. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, v. 248, pp. 60–69. DOI: 10.1016/j.agrformet.2017.09.005
- [65] Sgubin G., Swingedouw D., Dayon G., Garcia de Cortazar-Atauri I., Ollat N., Page C., van Leeuwen C. The risk of tardive frost damage in French vineyards in a changing climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, v. 250–251, pp. 226–242. DOI:10.1016/j.agrformet.2017.12.253

This work was financially supported by the Russian Science Foundation, grant No. 23-26-00080

Authors' information

Velisevich Svetlana Nikolaevna — Cand. Sci. (Biology), Senior Staff Scientist, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, s_n_velisevich@mail.ru

Popov Aleksander Vladimirovich  — Engineer of the 1st category, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, tomskcelttic@gmail.com

Mel'nik Maria Alekseevna — Cand. Sci. (Geography), Staff Scientist, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, melnik-m-a@yandex.ru

Goroshkevich Sergey Nikolaevich — Dr. Sci. (Biology), Chief Scientist, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, pearldiver@yandex.ru

Received 13.05.2024.

Approved after review 15.07.2024.

Accepted for publication 22.08.2024.

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

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРНО-МОРФОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СУЛЬФАТНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ ИНТРОДУЦИРОВАННОЙ СОСНЫ СКРУЧЕННОЙ ПРИ РАЗМОЛЕ

Я.В. Казаков✉, Н.А. Бабич, Н.А. Крушевская

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

j.kazakov@narfu.ru

Выявлены и проанализированы особенности изменения структурно-размерных свойств сульфатной небеленой целлюлозы из сосны скрученной (*Pinus contorta* var. *latifolia* Engelm) в условиях лабораторного стандартизированного размола до 60 °ШР на мельнице Йокро. Охарактеризованы различия в свойствах волокон, измеренных на автоматическом анализаторе волокна L&W Fiber Tester, в образцах целлюлозы с высоким (число Каппа 56 ед.) и низким (число Каппа 25 ед.) содержанием лигнина. Показано, что при уменьшении содержания лигнина в целлюлозе, снижаются средняя длина волокна с 2,1 до 1,9 мм, средняя ширина с 31,4 до 30,1 мкм, фактор формы 89,2 до 82,1 %, повышается число изломов на 1 мм с 0,28 до 0,81. Выявлено, что характер изменения фракционного состава по длине, ширине и фактору формы волокна, а также структурно-размерных свойств целлюлозы из сосны скрученной при размоле зависит коренным образом от содержания лигнина. Установлено, что волокна с низким содержанием лигнина легче разрушаются при размоле по местам дефектов, а оставшиеся фрагменты обладают повышенной прямизной. Показано изменение эффекта размола от преимущественной фибрилляции и незначительного увеличения мелочи для волокон целлюлозы с высоким содержанием лигнина, к преимущественной рубке волокон с низким содержанием лигнина. При уменьшении содержания лигнина увеличивается скорость снижения длины волокна при размоле, и меняется направление изменения структурно-размерных свойств.

Ключевые слова: сосна скрученная, интродукция, волокно, сульфатная целлюлоза, структурно-морфологические свойства, фракционный состав

Ссылка для цитирования: Казаков Я.В., Бабич Н.А., Крушевская Н.А. Изменение структурно-морфологических свойств сульфатной целлюлозы из древесины интродуцированной сосны скрученной при размоле // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 5. С. 153–165. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-153-165

В современных условиях при поиске новых быстро возобновляемых источников сырьевых ресурсов для химической переработки растительного сырья актуальность приобретает искусственное выращивание лесов [1]. Интродукция перспективных пород деревьев как вариант искусственного лесовыращивания также активно используется в мировой практике [2–4]. Кроме того, интродукция способствует расширению ареала вида и обогащению видового состава лесных фитоценозов [5, 6]. Технология применяется для выращивания как лиственных, так и хвойных пород, и получила распространение благодаря своему большому потенциалу и повышению продуктивности пород за счет их быстрого роста, простоты выращивания, улучшению их характеристик, подходящих для деревоперерабатывающей промышленности в целом и для целлюлозно-бумажной в частности [5, 7, 8]. При этом механическая и химическая переработка древесины как ведущие отрасли лесопромышленного комплекса (ЛПК) часто развиваются совместно и при достойном лесосырьевом обеспечении функционируют совместно [9].

Около 15 % заготавливаемой древесины перерабатывается химическими методами в основном для целей целлюлозно-бумажной промышленности, т. е. получения технической целлюлозы, используемой главным образом для производства бумаги и картона [10]. Делигнификация древесного сырья в данном случае нацелена на извлечение целлюлозы, составляющей наряду с лигнином и гемицеллюлозами основу физической структуры древесины. Благодаря фибриллярной и линейной структурам полимерных молекул волокна технической целлюлозы обладают способностью к формированию структуры листовых материалов (бумаги, картона), а после химической переработки образуют биоразлагаемые нити, применяемые для тканых материалов и биополимерных пленок [10].

Плантационное выращивание лиственных пород, в частности эвкалипта, как сырья для производства товарной целлюлозы достаточно давно себя хорошо зарекомендовало, и используется в странах Южной Америки и Индокитая. Важное значение имеет обеспечение предприятий целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП) древесиной хвойных пород. Поскольку продолжительность выращивания хвойных пород

существенно больше, чем лиственных, а потребность в длиноволокнистой хвойной целлюлозе сохраняется, то актуальность применения данной технологии не вызывает сомнений. Имеется положительный опыт интродукции лиственницы в европейскую часть России [11], которая крайне необходима как сырье для крупнейших предприятий ЦБП группы «Илим» Иркутской области [8]. Тем не менее из многих видов древесины хвойных пород ведущее место в отечественной ЦБП занимает сосна, а проблемы ее искусственного выращивания имеют первостепенное значение [3, 5, 12, 13].

Сосна скрученная широколистная (широкохвойная) (*Pinus contorta* Loud. var. *Latifolia* S. Wats) естественно произрастает в западной части Северной Америки: от штата Нью-Мексико на юге США до Территории Юкон в Северной Канаде. Исследования, проведенные в Швеции [2, 14], Ирландии, Великобритании и Латвии [7, 15], подтвердили, что сосна перспективна для ускоренного выращивания древесины, пригодной для ЦБП в странах с умеренным климатом.

Отечественный опыт работы по исследованию приживаемости и быстрому росту североамериканской сосны скрученной (*Pinus contorta* var. *latifolia* Engelm) в Архангельской [16], Ленинградской [17], Вологодской [18] и Новгородской областях, республике Коми [19, 20] и Карелии показал [21–23], что она опережает местные породы по скорости роста, превосходит по выживаемости, высоте и объему ствола. К 40 годам сосна скрученная достигает возраста рубки на балансы и на 70 % имеет большую продуктивность, чем местные ель и сосна обыкновенная [21, 25–27].

Для характеристики бумагообразующих свойств волокон, извлеченных из древесины в целях получения товарной целлюлозы, бумаги или картона, чрезвычайно важна информация о структурно-размерных или, более широко, структурно-морфологических свойствах растительных волокон. Длина и ширина волокна, его жесткость и способность сохранять размеры и форму при воздействии гидромеханических нагрузок при размоле в процессе массоподготовки на фабриках ЦБП, имеют ключевое значение [28–30]. При этом размол волокнистых полуфабрикатов является необходимым и самым важным процессом всего производства бумаги [31–34].

В процессе размола происходит направленное изменение начального состояния волокна, т. е. его природных структурно-морфологических свойств [35–38]. Для контроля процесса в настоящее время применяются анализаторы волокна, позволяющие в автоматическом режиме провести измерения характеристик до 20 тыс. отдельных волокон [39]. Международными стандартами измерения длины

волокна с применением автоматических анализаторов являются стандарты ISO 16065-1 (используется поляризованный свет) и ISO 16065-2 (неполяризованный свет). Полученные результаты представляются в виде набора средних значений, гистограмм распределения характеристик длины, ширины и кривизны волокон, а также доли мелочи, нескольких значений размеров волокон, учитывающих взвешенную, объемную или массовую долю, и параметров, оценивающих степень повреждения волокна [28, 40].

Ранее были установлены различия в структурно-морфологических свойствах сульфатной целлюлозы, производимой из сосны обыкновенной и сосны скрученной, которые показали, что свойства волокон сосны скрученной изменяются в более сильной степени, а размол до одинаковой степени помола сглаживает различия во фракционном составе по длине волокна. Засвидетельствована меньшая прочность стенки волокна целлюлозы из сосны скрученной, что связано с ее ускоренным ростом [41].

Цель работы

Цель работы — исследование закономерностей формирования структурно-морфологических свойств целлюлозного волокна из интродуцированной сосны скрученной (*Pinus contorta* var. *latifolia* Engelm), выращенной в Приморском районе Архангельской области, а также комплексная оценка изменения свойств волокнистого полуфабриката с высоким и низким содержанием лигнина при гидромеханическом воздействии в условиях стандартизированного лабораторного размола на мельнице Йокро с применением автоматического анализатора волокна L&W Fiber Tester.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является целлюлозное волокно, полученное сульфатным способом из сосны скрученной, местом произрастания которой является Приморский район Архангельской области. Исследованный экземпляр сосны скрученной в возрасте 22 года имел высоту 5,5 м, диаметр ствола 15...17 см, что соответствует таким же параметрам сосны обыкновенной в возрасте 45 лет. Для получения целлюлозы ручным способом была изготовлена щепа размером $15 \pm 3 \times 25 \pm 2 \times 5 \pm 1$ мм. Сульфатная варка проведена на автоклавной системе CAS 420 в лаборатории волокнистых полуфабрикатов Инновационно-технологического центра «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» САФУ. Были получены полуфабрикаты двух видов: с высоким содержанием лигнина для производства картона, и с низким — для последующего отбеливания и производства бумаги.

Для этого изменяли расход активной щелочи на варку, гидромодуль и продолжительность процесса. Полученная целлюлоза с выходом 47,5 % и числом Каппа = 56 ед., что соответствует содержанию лигнина 12,9 %, была определена как целлюлоза для производства картона, а целлюлоза с выходом 41,8 % и числом Каппа = 25 ед., что соответствует содержанию лигнина 1,8 %, как целлюлоза для производства бумаги [41].

Размол в лабораторных условиях выполнен на мельнице Йокро при концентрации массы 6 %. Отбор образцов целлюлозной массы для анализа проводился до размола (после роспуска в гидро-разбивателе) и через каждые 10...20 мин размола до итоговой степени помола 60...62 °ШР. У каждой пробы, взятой из размольного стакана, сразу определяли степень помола и отбирали образец, содержащий 0,1 г абсолютно сухого (а. с.) волокна для измерения структурно-размерных свойств.

Структурно-размерные свойства каждой пробы целлюлозы определяли на автоматическом анализаторе волокна L&W Fiber Tester [39], который позволяет выполнить измерения по расширенному перечню характеристик в автоматическом режиме. При проведении измерений в поляризованном свете делаются цифровые снимки сильно разбавленной суспензии в виде тонкого плоского ламинарного потока по стандарту ISO 16065-1. Разрешение во время измерения составляет 0,2 мкм. По результатам анализа пробы формируется отчет на экране в виде таблиц и графиков, а также выполняется экспорт результатов в формате, позволяющем их загрузить в электронную таблицу Excel.

Для сравнительной обработки результатов измерений использована технология сравнительного анализа свойств волокон, реализованная в электронной таблице в MS Excel, которая позволяет выбрать образцы для анализа, представить данные в табличном виде и построить сравнительные диаграммы свойств и фракционного состава [40].

Результаты и обсуждение

Способность целлюлозных волокнистых полуфабрикатов к размолу характеризуется графиком изменения степени помола волокнистой суспензии при размолу на стандартном лабораторном размалывающем аппарате (мельнице Йокро при концентрации массы 6 %) в течение времени, в результате получается кривая размола. Оценка способности целлюлозы из сосны скрученной с высоким и низким содержанием лигнина к размолу была выполнена в сравнении с производственной товарной сульфатной небеленой хвойной целлюлозой марки НС-2.

В процессе размола в присутствии воды, попадая между ножами размалывающего барабана и

стенками размольного стакана, волокна подвергаются воздействию механических и гидродинамических сил, что вызывает комплекс механических, физико-химических и коллоидных процессов на поверхности волокон и в структуре их клеточной стенки. Скорость увеличения степени помола характеризует способность клеточной стенки противостоять этим воздействиям, а результат проявляется в изменении скорости водоотдачи и количественно выражается в градусах Шоппер — Риглера (°ШР).

Полученные кривые размола (рис. 1), являются типичными для большинства полуфабрикатов, что выражается в постепенном нарастании скорости роста степени помола.

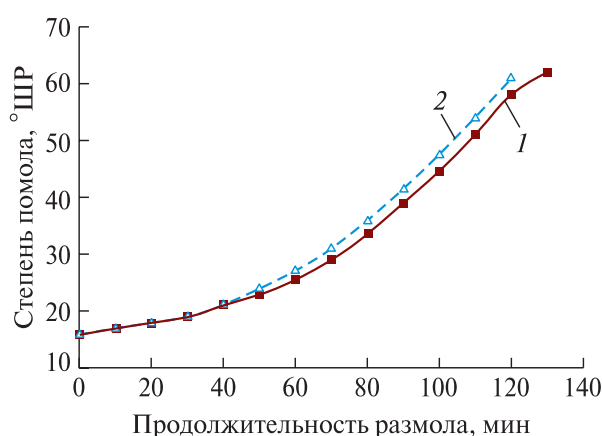


Рис. 1. Кривые размола хвойной небеленой сульфатной целлюлозы из сосны скрученной: 1 — число Каппа 56 ед.; 2 — число Каппа 25 ед.

Fig. 1. Refining curves of unbleached kraft softwood pulp from introduced Lodgepole pine: 1 — Kappa number 56; 2 — Kappa number 25

Кривые размола целлюлозы из сосны скрученной (см. рис. 1) показывают, что размол целлюлозы с низким содержанием лигнина идет быстрее. Однако на начальном этапе, до достижения 22 °ШР, скорость увеличения степени помола примерно одинаковая. На последующих этапах, когда начинает нарушаться сплошность клеточной стенки, наиболее быстро растет степень помола у целлюлозы с низким содержанием лигнина, что свидетельствует о меньшей прочности поверхности волокон и более быстрых процессах фибрилляции.

Сравнение этих результатов с ранее полученными данными [39, 40] показало, что исследованные образцы целлюлозы из сосны скрученной в лабораторных условиях требуют повышенного расхода энергии на размол, а наиболее трудно размалывается целлюлоза с высоким содержанием остаточного лигнина, который, обладая достаточной гидрофобностью, повышает прочность клеточной стенки волокон и блокирует

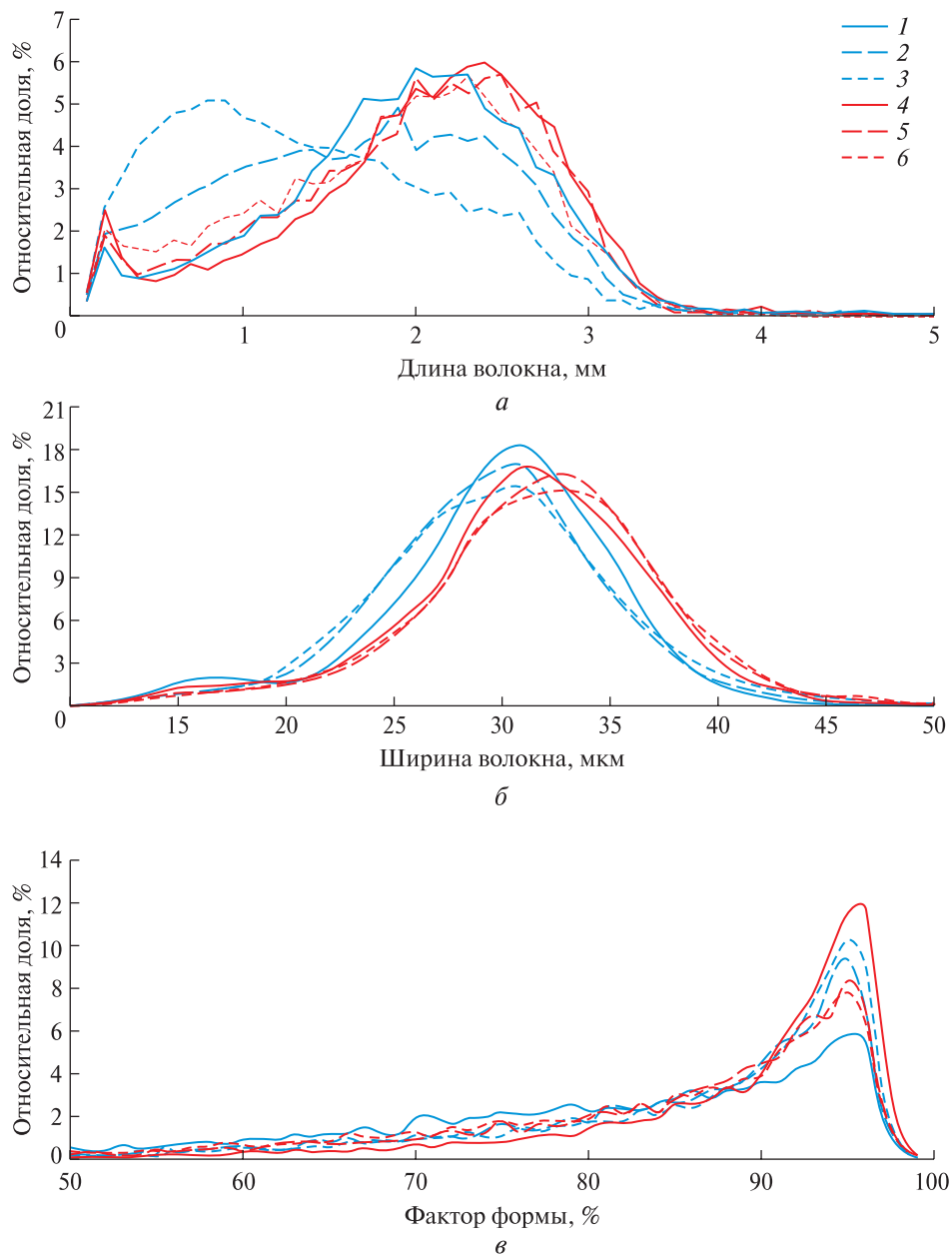


Рис. 2. Фракционный состав целлюлозы из сосны скрученной: *a* — по длине волокна; *б* — по ширине волокна; *в* — по фактору формы (прямызне) волокон; 1 — число Каппа 25 ед., 16 °ШП; 2 — число Каппа 25 ед., 27 °ШП; 3 — число Каппа 25 ед., 61 °ШП; 4 — число Каппа 56 ед., 16 °ШП; 5 — число Каппа 56 ед., 26 °ШП; 6 — число Каппа 56 ед., 62 °ШП

Fig. 2. Fractional composition of pulp from Lodgepole pine: *a* — by fibre length; *б* — by fibre width; *в* — by fibre shape factor (straightness); 1 — number of Kappa 25 units, 16 °SR; 2 — number of Kappa 25 units, 27 °SR; 3 — number of Kappa 25 units, 61 °SR; 4 — number of Kappa 56 units, 16 °SR; 5 — number of Kappa 56 units, 26 °SR; 6 — number of Kappa 56 units, 62 °SR

проникновение воды в клеточную стенку, препятствуя гидратации волокон. Таким образом, волокнистые полуфабрикаты из сосны скрученной оказывают высокое сопротивление размолу. Наличие лигнина замедляет разمول, поскольку имеет более высокую прочность клеточной стенки. В этих условиях наблюдается изменение структурно-размерных свойств их волокон при размоле.

Количественная оценка изменения в структурно-морфологических свойствах волокон при размоле получена с помощью анализатора волокна L&W FiberTester [39].

На рис. 2 представлено изменение фракционного состава по длине (размер класса 0,1 мм), ширине (размер класса 2 мкм) и фактору формы (размер класса 1 %) волокна при размоле целлюлозы из сосны скрученной с высоким (число

Каппа 56 ед.) и низким (число Каппа 24 ед.) содержанием лигнина. Взвешивание выполнялось по длине волокна. Силовое воздействие размалывающей гарнитуры на волокно вызывает направленные изменения содержания фракций по длине волокна (см. рис. 2, а), при этом происходит последовательное увеличение содержания коротковолокнистых фракций с длиной менее 1 мм, и снижение содержания фракций с длиной более 2,0 мм. Для образцов с низким содержанием лигнина изменение происходит резкое и перераспределение содержания фракций очень заметно. Соответственно, сдвигается в коротковолокнистую область положение максимума на кривой распределения по длине волокна от 2,1 мм для неразмолотой целлюлозы до 0,9 мм при 61 °ШР.

Изменение диаграмм фракционного состава по длине волокна для целлюлозы с высоким содержанием лигнина имеет принципиально другой характер. Диаграммы неразмолотой и размолотой до 62 °ШР отличаются незначительно, при этом наиболее заметно увеличение самой мелкой фракции (с длиной волокна 0,3...0,4 мм). Другими словами при размоле происходит образование мелочи, а не рубка волокон при определенном развитии поверхности. Положение максимума изменяется незначительно в сторону более низких значений длины волокон.

Изменение при размоле диаграмм фракционного состава по ширине волокна (см. рис. 2, б) также отличается для целлюлозы с высоким и низким содержанием лигнина. При этом в целом имеет место увеличение полидисперсности волокон по ширине при росте степени помола. У целлюлозы с низким содержанием лигнина положение максимума сдвигается незначительно в сторону уменьшения, а его высота заметно сокращается, т. е. происходит перераспределение фракций с шириной волокна 20...25 мкм в сторону увеличения. Таким образом, изменение средней ширины волокна при размоле связано в основном не со сдвигом положения максимума, а за счет увеличения содержания фракций с шириной 20...25 мкм. Иначе говоря, изначально лентообразные волокна при механическом воздействии размалывающей гарнитуры подвергаются расщеплению, тем самым уменьшаясь в ширине.

У целлюлозы с высоким содержанием лигнина изменение диаграмм иное. Изначально жесткие волокна трубчатой формы в результате размола сплющиваются, и наблюдается увеличение их ширины. Соответственно, максимум диаграмм смещается в сторону больших значений и увеличивается содержание фракций шириной волокна более 35 мкм.

Диаграммы фракционного состава по фактору формы волокна сосны скрученной с высоким и

низким содержанием лигнина также имеют отличия (см. рис. 2, в), однако главным образом в области практически прямых волокон с фактором формы выше 92 %. У неразмолотой целлюлозы сосны скрученной с высоким содержанием лигнина наблюдается наибольший максимум, т. е. в ней очень много жестких и прямых волокон.

При размоле целлюлозы из сосны скрученной с низким содержанием лигнина повышается содержание практически прямых волокон с фактором формы выше 95 %, что доказывает влияние размола на волокно, при котором длинные волокна с дефектами в виде перегибов и перекручиваний вследствие гидромеханических нагрузок подвергаются рубке по местам дефектов, а оставшиеся фрагменты волокон являются относительно прямыми.

При размоле жестких волокон с высоким содержанием лигнина, благодаря которому стенка волокна прочнее, обрывков волокон образуется меньше, а размолотые волокна получают некоторую извитость, и доля волокон, форма которых близка к прямолинейной, снижается.

Данные о структурно-размерных свойствах волокон из целлюлозы сосны скрученной с низким содержанием лигнина, изменяющихся при размоле, представлено в табл. 1, из которой следует, что средняя длина волокна закономерно снижается с 1,94 до 1,38 мм за счет рубки, значения ширины сохраняются около 30 мкм. Фактор формы, характеризующий степень прямизны волокон, увеличивается с 82,1 до 87,1 % за счет того, что изогнутые фрагменты волокон обрываются при размоле, происходит накопление мелочи в массе с 2,0 до 3,2 %.

Характер изменения характеристик волокон при размоле целлюлозы из сосны скрученной с высоким содержанием лигнина несколько иной (табл. 2). Средняя длина волокна при размоле уменьшается с 2,06 до 1,86 мм, а ширина возрастает с 31,4 до 32,2 мкм, фактор формы снижается с 89,2 до 84,7, т. е. в результате размола такой целлюлозы волокна искривляются, сохраняя свою длину.

Различия в размерных свойствах данных полуфабрикатов проявляются, если рассмотреть коэффициент вытянутости волокон (отношение длины волокон к ширине), который является важным показателем, характеризующим потенциал структурообразования бумажного листа при отливе. У волокон с высоким содержанием лигнина коэффициент вытянутости волокон снижается от 64,4 у неразмолотой до 46,1 при размоле до 61 °ШР (изменение составляет 18,3). У целлюлозы с высоким содержанием лигнина он варьируется при размоле от 65,5 до 57,8, т. е. изменение составляет всего 7,7.

Т а б л и ц а 1

**Изменение структурно-морфологических свойств волокон
небеленой сульфатной целлюлозы сосны скрученной с числом Каппа 25 при размоле**
Changes in the structural and morphological properties of Lodgepole pine (Kappa number 25) fibers during refining

Параметр	Продолжительность размола, мин							
	0	20	40	60	80	90	110	120
Степень помола, °ШП	16	18	21	27	36	41	54	61
Средняя длина волокна l_{cp} , мм	1,94	1,90	1,81	1,67	1,59	1,54	1,43	1,38
Средняя ширина волокна b , мкм	30,1	29,7	29,6	29,7	29,9	29,9	29,9	30,0
Коэффициент вытянутости l_{cp}/b	64,4	63,9	61,1	56,3	53,2	51,6	47,7	46,1
Средний фактор формы f , %	82,1	84,7	85,3	85,9	86,4	86,5	87,1	87,1
Содержание мелочи (<0,2 мм) m , %	2,0	2,3	2,4	2,4	2,5	2,7	3,0	3,2
Грубость G , дг	183	157	148	153	145	156	126	141
Средний угол излома u , град.	60,5°	61,4°	62,4°	63,3°	63,0°	61,8°	60,7°	60,6°
Число изломов на 1 мм n_1	0,811	0,510	0,468	0,461	0,473	0,464	0,461	0,462
Число больших изломов на 1 мм n_{1b}	0,345	0,212	0,205	0,208	0,210	0,196	0,189	0,196
Число изломов на волокно, n	1,348	0,824	0,716	0,628	0,595	0,575	0,530	0,511
Число больших изломов на волокно n_b	0,573	0,343	0,314	0,284	0,273	0,242	0,217	0,217
Средний индекс излома I	2,222	1,420	1,317	1,306	1,337	1,295	1,275	1,274
Средняя длина сегмента l_s , мм	1,236	1,346	1,334	1,250	1,188	1,170	1,108	1,075

Т а б л и ц а 2

**Изменение структурно-морфологических свойств волокон небеленой
сульфатной целлюлозы сосны скрученной с числом Каппа 56 при размоле**
Changes in the structural and morphological of Lodgepole pine properties (Kappa number 56) fibers during refining

Параметр	Продолжительность размола, мин							
	0	20	40	60	80	90	110	130
Степень помола, °ШП	16	18	21	26	34	39	51	62
Средняя длина волокна l_{cp} , мм	2,06	2,00	1,99	1,97	1,96	1,95	1,92	1,86
Средняя ширина волокна b , мкм	31,4	31,3	31,7	32,1	32,1	32,1	32,2	32,2
Коэффициент вытянутости l_{cp}/b	65,5	63,9	62,6	61,4	61,2	60,8	59,7	57,8
Средний фактор формы f , %	89,2	85,7	85,2	85,1	85,0	85,0	85,0	84,7
Содержание мелочи (<0,2 мм) m , %	2,9	2,9	2,9	2,7	2,6	2,5	2,5	2,7
Грубость G , дг	211	169	159	168	182	165	156	161
Средний угол излома u , град.	54,8°	63,6°	65,5°	65,2°	67,2°	65,6°	66,7°	66,0°
Число изломов на 1 мм n_1	0,281	0,404	0,366	0,379	0,396	0,407	0,400	0,432
Число больших изломов на 1 мм n_{1b}	0,094	0,181	0,176	0,182	0,201	0,192	0,202	0,213
Число изломов на волокно, n	0,495	0,576	0,614	0,633	0,663	0,675	0,670	0,673
Число больших изломов на волокно n_b	0,165	0,258	0,295	0,303	0,336	0,318	0,328	0,332
Средний индекс излома I	0,735	1,147	1,063	1,095	1,165	1,179	1,169	1,256
Средняя длина сегмента l_s , мм	1,692	1,547	1,519	1,491	1,475	1,461	1,437	1,371

Наблюдается направленное изменение структурно-размерных свойств, которое не является уникальным [42] и характерно для многих волокнистых полуфабрикатов из хвойных и лиственных пород древесины. Сравнимые волокнистые полуфабрикаты изначально незначительно различаются по длине, ширине и коэффициенту вытянутости, а их изменение при размоле определяется наличием лигнина в стенке волокна.

В связи с изложенными особенностями изменения структурно-размерных свойств целлюлозы

в процессе размола удобнее анализировать, если вычислить относительное их изменение, приняв за 100 % величины после роспуска. Графики, отражающие эти закономерности, представлены на рис. 3. В качестве образца сравнения при оценке скорости размола принят производственный образец товарной сульфатной небеленой хвойной целлюлозы марки НС-2, у которого число Каппа 26 ед., исходная средняя длина 2,34 мм, средняя ширина 28,8 мкм, средний фактор формы 85,0 [28].

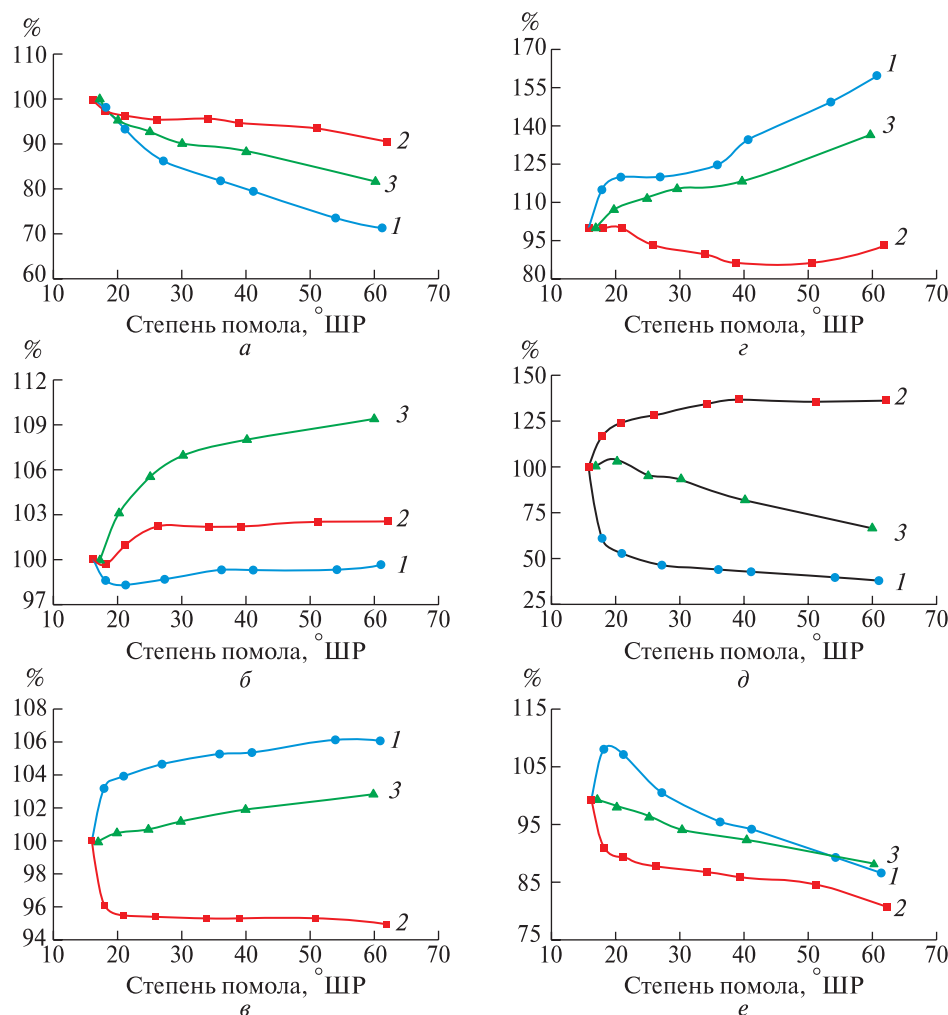


Рис. 3. Относительное изменение структурно-размерных свойств сульфатной небеленой целлюлозы в процессе размола. За 100 % приняты величины после роспуска: 1 — из сосны скрученной, число Каппа 25 ед.; 2 — из сосны скрученной, число Каппа 56 ед.; 3 — производственная НС-2 [28]; а — средняя длина волокна; б — средняя ширина волокна; в — средний фактор формы; г — содержание мелочи (<0,2 мм); д — среднее число изломов на волокно; е — средняя длина сегмента

Fig. 3. Relative change in the structural and dimensional properties of the kraft unbleached softwood pulp in the refining; for 100 % the values after dispergation are taken: 1 — lodgepole pine pulp, kappa number 25; 2 — lodgepole pine pulp, kappa number 56; 3 — industrial pulp USKP-2 [28]; а — the average fiber length; б — average fiber width; в — the mean shape factor; г — fines content; д — the average number of kinks per fiber; е — average segment length

При последовательном увеличении степени помола целлюлозы от исходной до 61...62 °ШР у них всех наблюдается снижение средней длины волокна, однако наибольшее снижение зафиксировано у целлюлозы из сосны скрученной с низким содержанием лигнина — на 28,6 %, в отличие от целлюлозы с высоким содержанием лигнина — на 9,5 % (см. рис. 3, а). У производственной целлюлозы НС-2 снижение на 18,4 %, что соответствует среднему значению.

При размоле происходят два одновременно протекающих процесса. С одной стороны, в результате размола повышается гибкость волокон за счет нарушения сплошности клеточной стен-

ки — внутренней фибрилляции, а также гидратации. С другой — в результате механического воздействия имеет место рубка волокон, которая проходит в основном по ослабленным изломами участкам клеточной стенки. Таким образом, изогнутые ранее концевые участки волокон отрываются.

При этом происходит накопление мелочи в массе (волокна длиной <0,2 мм, см. рис. 3, г), которое для мягкой целлюлозы максимально. Увеличение размола до 61 °ШР составляет 60 относительных процента (с 2,0 до 3,2 %). При размоле жесткой целлюлозы с числом Каппа 56 ед. увеличения мелочи не зафиксировано, что, видимо,

связано с дополнительным измельчением обрывков волокон, которые теряют вытянутую форму и программным обеспечением прибора не воспринимаются как волокна.

Фактор формы волокна оценивает степень прямизны (или кривизны) волокон и вычисляется как отношение длины хорды, соединяющей концы волокна, к длине волокна, при этом влияет на формирование структуры бумажного листа. Измерения проводятся в условиях свободного движения волокон в ламинарном потоке сильно разбавленной водной суспензии. Отклонение формы волокна от прямолинейной определяется гибкостью волокон и наличием на них локальных повреждений — изломов. Чем прямее волокно, тем ближе значение фактора формы к 100 %.

Содержание лигнина в целлюлозе определяет жесткость и прочность клеточной стенки волокна, поэтому для целлюлоз с высоким и низким содержанием лигнина тенденции изменения фактора формы противоположны (см. рис. 3, в). Изначально волокна целлюлозы с высоким содержанием лигнина более прямые и при размоле становятся более гибкими, фактор формы снижается. Волокна с низким содержанием лигнина легче разрушаются по местам дефектов, а оставшиеся фрагменты — более прямые.

При выделении целлюлозных волокон из растительного сырья в процессах диспергирования, перемешивания, сгущения и транспортировки волокнистой суспензии волокна действием механических нагрузок, часто при повышенной температуре и pH, получают повреждения, степень которых оценивается с помощью количества и угла изломов, а также размеров прямолинейных сегментов на волокне. Именно поврежденность клеточной стенки является важным фактором при выяснении отклонений в бумагообразующих и физико-механических характеристиках полуфабрикатов и готовой продукции в виде бумаги и картона. Проявляются дефекты в виде перегибов, скручивания, складок, микросжатий клеточной стенки волокна, возникающих в процессе получения полуфабрикатов и их последующей обработки в технологических объектах. При этом воздействие на слабые участки волокна приводит к необратимым изменениям — их изломам и обрывам [31, 42].

Дефекты клеточной стенки фиксируются анализатором волокна Fiber Tester как изломы волокна (при условии, что угол составляет свыше 30°). Количество изломов и их интенсивность зависят от прочности стенки волокна и по-разному могут влиять на формирование структуры бумаги, с одной стороны, и прочности — с другой. Более деформированные волокна улучшают равномерность формования и плотность листа,

но одновременно снижают прочность бумаги за счет снижения собственной прочности волокон. Кроме того, в условиях интенсивных нагрузок на волокно при размоле изломы способствуют укорочению волокна.

Средний угол излома целлюлозы с низким содержанием лигнина изменяется незначительно — в пределах $60,5 \dots 63,3^\circ$. Для жесткой целлюлозы средний угол излома в результате размола после начального резкого роста примерно на 10° , далее увеличивается незначительно составляя 66° при 62°ШР . Это соответствует изменению фактора формы. Количество изломов на волокно также изменяется при размоле, и, как следствие, средняя длина сегментов (неповрежденных жестких участков клеточной стенки) существенно изменяется, и мягкой целлюлозы это происходит активнее, чем у жесткой.

Выводы

По результатам проведенного эксперимента установлены особенности изменения структурно-размерных свойств сульфатной небеленой целлюлозы из сосны скрученной (*Pinus contorta* var. *latifolia* Engelm) в условиях лабораторного стандартизированного размола.

Волокнистые полуфабрикаты из сосны скрученной оказывают высокое сопротивление размолу, требуя повышенного расхода энергии на размол. Труднее поддается размальванию целлюлоза с высоким содержанием остаточного лигнина.

Волокна целлюлозы для производства картона (число Каппа 56 ед.) по сравнению с целлюлозой для последующего отбеливания и производства бумаги (число Каппа 25 ед.) более длинные (2,1 мм против 1,9 мм), более широкие (31,4 мкм против 30,1 мкм) и менее изогнутые (фактор формы 89,2 против 82,1) и имеют меньше число изломов на 1 мм (0,28 против 0,81).

Изменение фракционного состава по длине, ширине и фактору формы волокна, а также структурно-размерных свойств целлюлозы из сосны скрученной зависит коренным образом от содержания лигнина. Более глубокая делигнификация волокон древесины сосны скрученной приводит не только к изменению содержания лигнина, но и к снижению прочности и жесткости отдельных волокон. Волокна с низким содержанием лигнина легче разрушаются по местам дефектов, а оставшиеся фрагменты обладают повышенной прямизной. В результате изменяется эффект размола от преимущественной фибрилляции и незначительного увеличения мелочи для волокон целлюлозы для картона к преимущественной рубке волокон, которая проходит в основном по ослабленным изломами участкам клеточной стенки. В результате изогнутые ранее концевые участки волокон


отрываются. При этом увеличивается скорость снижения длины волокна, изменяется направление изменения структурно-размерных свойств при размоле, разнонаправленно изменяется содержание мелочи, число изломов на волокно и средняя длина сегмента.

Список литературы

- [1] Мелехов И.С. Интродукция хвойных в лесном хозяйстве // Лесоведение, 1984. № 6. С. 72–78.
- [2] Bäcklund S. The Introduction of *Pinus contorta* in Sweden. Implications for forest diversity: Doctoral Thesis Swedish University of Agricultural Sciences Uppsala / Sofia Bäcklund // SLU Service/Repro, Uppsala, 2016, 56 p.
- [3] Дроздов И.И., Александрова М.С., Румянцев Д.Е. Влияние климатических факторов на радиальный прирост сосны кедровой сибирской (*Pinus Sibirica* Du Tour.) в условиях Главного ботанического сада РАН // Бюллетень Главного ботанического сада, 2008. № 194. С. 56–60.
- [4] Jansons A., Sisenis L., Neimane U., Rieksts-Riekstins J. Biomass production of young lodgepole pine (*Pinus contorta* var. *latifolia*) stands in Latvia // iForest — Biogeosciences and Forestry, 2013, v. 6, iss. 1, pp 10–14. DOI: <https://doi.org/10.3832/ifer0637-006>
- [5] Полубояринов О.И. Федоров Р.Б. Обоснование выбора древесных пород при выращивании древесины как сырья для целлюлозно-бумажной промышленности // Лесоводство, лесные культуры и почвоведение. Л.: Изд-во ЛТА, 1990. С. 63–67.
- [6] Knight D. H., Baker W. L., Engelmark O., Nilsson C. A landscape perspective on the establishment of exotic tree plantations: Lodgepole pine (*Pinus contorta*) in Sweden // Forest Ecology and Management 2001, v. 141(1–2), pp. 131–142.
- [7] Sable I., Grinfelds U., Jansons A., Vikele L., Irbe I., Verovkins A., Treimanis A. Comparison of the properties of wood and pulp fibers from lodgepole pine (*Pinus contorta*) and scots pine (*Pinus sylvestris*) // Pine wood and fibers. BioResources, 2012, v. 7(2), pp. 1771–1783.
- [8] Bäcklund S., Jönsson M.T., Strengbom J., Göran T. Tree and stand structure of the non-native *Pinus contorta* in relation to native *Pinus sylvestris* and *Picea abies* in managed forests in boreal Sweden // Scandinavian J. of Forest Research, 2018, v. 33, iss. 3, pp. 245–254. DOI: 10.1080/02827581.2017.1364785
- [9] Пинягина Н.Б. Обзор и анализ статистической информации о деятельности целлюлозно-бумажной промышленности за 3 квартала 2021 года // Packaging R&D, 2022. № 1(45). С. 4.
- [10] Кононов Г.Н., Веревкин А.Н., Сердюкова Ю.В., Жукова В.А. Древесина как химическое сырье. История и современность. IV. Делигнификация древесины как путь получения целлюлозы. Часть II // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 2. С. 69–84. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-2-69-84
- [11] Брынцев В.А., Лавренов М.А. Оценка результатов интродукции видов рода *Larix Mill.* в центр европейской части России // Хвойные бореальной зоны, 2019. Т. XXXVII. № 6. С. 385–395.
- [12] Братилова Н.П., Коновалова Д.А., Нечаева Д.А., Алексеевич Е.Г. Биологическая продуктивность боковых побегов деревьев сосны кедровой сибирской разных форм // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений, 2018. Т. 21. С. 46–48.
- [13] Nakvasina E.N., Prozherina N.A. Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) reaction to climate change in the provenance tests in the north of the Russian plain // Folia Forestalia Polonica, Series A, 2021, t. 63, no. 2, pp. 138–149.
- [14] Elfving B., Ericsson T., Rosvall O. The introduction of lodgepole pine for wood production in Sweden — a review // Forest Ecology and Management, 2001, no. 141, pp. 15–29.
- [15] Dāble I., Grinfelds U., Jansons Ā., Vīele L., Irbe I., Verovkins A., Bāders E., Treimanis A. Suitability of Scots pine (*Pinus sylvestris*) and lodgepole pine (*Pinus contorta*) wood for paper production: Comparative analysis // Mežzinātne, 2012, no. 26(59), pp. 155–166 (in Latvian with English abstract).
- [16] Стафеев Б.Л. Североамериканская сосна скрученная — перспективная порода для интродукционного испытания в Архангельской области // Вопросы интродукции хозяйственно ценных древесных пород на Европейский Север. Архангельск: Изд-во АИЛиЛХ, 1989. С. 35–43.
- [17] Алексеев В.М., Жигунов А.В., Бондаренко А.С., Бурцев Д.С. Интродукция сосны скрученной в условиях Ленинградской области // ИзВУЗ Лесной журнал, 2014. № 3. С. 24–33.
- [18] Корчагов С.А., Грибов С.Е., Смирнов А.В., Хамитов Р.С., Щекалев Р.В. Влияние типа условий местопроизрастания и географического положения популяций на степень интрогрессивной гибридизации ели в Вологодской области // Лесохозяйственная информация, 2020. № 4. С. 94–104.
- [19] Гутый Л.Н., Федорков А.Л. Экспериментальные культуры сосны скрученной в Сыктывкарском лесничестве республики Коми // ИзВУЗ Лесной журнал, 2016. № 1. С. 48–54.
- [20] Федорков А.Л., Туркин А.А. Экспериментальные культуры сосны скрученной в Республике Коми // Лесоведение, 2010. № 1. С. 70–74.
- [21] Демидова Н.А., Дуркина Т.М., Гоголева Л.Г., Демиденко С.А., Быков Ю.С., Парамонов А.А. Рост и развитие сосны скрученной (*Pinus contorta* Loud. var. *latifolia* S. Wats) в условиях северной тайги // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства, 2016. № 2. С. 45–59.
- [22] Раевский Б.В., Мордась А.А. Ход роста культур сосны скрученной в подзоне средней тайги // ИзВУЗ Лесной журнал, 2005. № 1–2. С. 23–33.
- [23] Фекистов П.А., Бирюков С.Ю., Федяев А.Л. Сравнительные эколого-биологические особенности сосны скрученной и обыкновенной в северной подзоне европейской тайги. Архангельск: Изд-во Архангельского ГТУ, 2008. 118 с.
- [24] Бабич Н.А., Хамитов Р.С., Андропова М.М. Ступенчатая интродукция древесных растений на севере Русской равнины. Архангельск: Изд-во САФУ, 2021. 412 с.
- [25] Нилов В.Н., Павлова М.А., Стафеев Б.Л. О качестве древесины североамериканской сосны скрученной на Европейском Севере // ИзВУЗ Лесной журнал, 1987. № 3. С. 56–60.
- [26] Heiðarsson L., Pukkala T., Snorrason A. Individual-tree growth models for lodgepole pine (*Pinus contorta*) in Iceland // Icelandic Agricultural Sciences, 2023, no. 36, pp. 81–93.
- [27] Zhu J.Y., Vahey D.W., Scott C.T., Myers G.C. Effect of tree-growth rate on papermaking fiber properties // Appita Journal, 2008, v. 61, no. 2, pp. 141–155.
- [28] Лебедев И.В., Казаков Я.В. Характеристика структурно-размерных свойств волокон хвойной сульфатной целлюлозы с применением статистического моделирования // Хвойные бореальной зоны, 2016. Т. XXXVII. № 5–6. С. 333–337.

- [29] Zeng X., Retulainen E., Heinemann S., Fu S. Fibre deformations induced by different mechanical treatments and their effect on zero-span strength // *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 2012, v. 27(2), pp. 335–342.
- [30] Kang K.-Y., Zhang S.Y., Mansfield S.D. The effects of initial spacing on wood density, fibre and pulp properties in jack pine (*Pinus Banksiana* Lamb.) // *Holzforschung*, 2004, v. 58, pp. 455–463.
- [31] Алашкевич Ю.Д., Севергин В.А., Решетова Н.С., Воронин И.А. Современные направления в области исследования процесса размола волокнистых материалов // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки. Красноярск: Изд-во СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2021. С. 246–248.
- [32] Gharekhani S., Sadeghinezhad E., Kazi S.N., Yarmand H., Badarudin A., Safaei M.R., Zubir M.N.M. Basic effects of pulp refining on fiber properties – A review // *Carbohydrate Polymers*, 2015, v. 115, pp. 785–803. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.08.047>
- [33] Chen T., Xie Y., Wei Q., Wang X. (Alice), Hagman O., Karlsson O., Liu J. Effect of Refining on Physical Properties and Paper Strength of *Pinus massoniana* and China Fir Cellulose Fibers // *BioResources*, 2016, v. 11(3). DOI:10.15376/biores.11.3.7839-7848
- [34] Sable I., Grinfelds U., Vikele L., Rozenberga L., Zeps M., Neimane U., Jansons A. Effect of Refining on the Properties of Fibres from Young Scots (*Pinus Sylvestris*) and Lodgepole Pines (*Pinus Contorta*) // *Baltic Forestry*, 2017, v. 23(2), pp. 529–533.
- [35] Ушаков А.В., Алашкевич Ю.Д., Кожухов В.А., Ковалев В.И. Современное состояние и перспективы совершенствования процесса размола волокнистых полуфабрикатов высокой концентрации (обзор) // *Химия растительного сырья*, 2020. № 4. С. 315–329. DOI 10.14258/jcprm.2020048251
- [36] Юртаева Л.В., Алашкевич Ю.Д., Каплев Е.В., Васильева Д.Ю., Слизикова Е.А. Анализ движения потока волокнистой суспензии в размалывающей установке при получении мелкодисперсной целлюлозы // *Химия растительного сырья*, 2023. № 3. С. 317–327. DOI: 10.14258/jcprm.20230312008.
- [37] Robertsen L., Joutsimo O. The effect of mechanical treatment on kraft pulps produced from different softwood raw materials // *Paperi ja Puu/Paper and Timber*, 2005, v. 87(2), pp. 111–115.
- [38] Joutsimo O., Robertsen L. The effect of mechanical treatment on kraft pulp fibers. Pulp and fiber properties // *Paperi ja Puu/Paper and Timber*, 2004, v. 86(5), pp. 359–364.
- [39] Li B., Bandekar R., Zha Q., Alsaggaf A., Ni Y. Fiber Quality Analysis: OpTest Fiber Quality Analyzer versus L&W Fiber Tester // *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2011, v. 50, pp. 12572–12578. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/ie201631q>
- [40] Казаков Я.В., Корельская Е.А. Технология расширенной сравнительной характеристики структурно-размерных свойств волокнистых полуфабрикатов по данным автоматического анализатора волокна // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: Материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. имени профессора В.И. Комарова, Архангельск, 14–16 сентября 2023 г. Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. Архангельск: Изд-во САФУ, 2023. С.31–37.
- [41] Крушевская Н.А., Казаков Я.В., Окулова Е.О., Бабич Н.А. Свойства сульфатной целлюлозы из древесины интродуцированной сосны, выращенной в условиях европейского севера // *Физикохимия растительных полимеров: Материалы X Междунар. конф.*, 26–29 июня 2023 г., Архангельск. Архангельск: Изд-во САФУ, 2023. С.121–124.
- [42] Ferritsius O., Ferritsius R., Rundlof M. Average fibre length as a measure of the amount of long fibres in mechanical pulps — ranking of pulps may shift // *Nord. Pulp Pap. Res. J.*, 2018, v. 33, no. 3, pp. 468–481. DOI: 10.1515/npprj-2018-3058

Сведения об авторах

Казаков Яков Владимирович  — д-р техн. наук, проф. кафедры целлюлозно-бумажных и лесохимических производств Высшей школы естественных наук и технологий, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), j.kazakov@narfu.ru

Бабич Николай Алексеевич — д-р с.-х. наук, проф. кафедры ландшафтной архитектуры и искусственных лесов Высшей школы естественных наук и технологий, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), n.babich@narfu.ru

Крушевская Наталья Андреевна — магистрант кафедры целлюлозно-бумажных и лесохимических производств Высшей школы естественных наук и технологий, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), n.krushevskaya@narfu.ru

Поступила в редакцию 07.03.2024.

Одобрено после рецензирования 27.06.2024.

Принята к публикации 22.08.2024.

KRAFT PULP STRUCTURAL AND MORPHOLOGICAL PROPERTY CHANGES PRODUCED FROM REFINED INTRODUCED LODGEPOLE PINE WOOD

Ya.V. Kazakov✉, N.A. Babich, N.A. Krushevskaya

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

j.kazakov@narfu.ru

Modification features in the structural and dimensional properties of kraft unbleached pulp obtained from Lodgepole pine (*Pinus contorta* var. *latifolia* Engelm) were identified and analyzed under laboratory standardized refining conditions of up to 60 SR at the Yokro mill. Measurements were carried out using an automatic fiber analyzer L&W Fiber Tester. Pulp fibers for board production (Kappa number 56), compared to pulp for subsequent bleaching and papermaking (Kappa number 25), are longer (2,1 mm versus 1,9 mm), wider (31,4 μ m versus 30,1 μ m), less curved (shape factor 89,2 versus 82,1) and have fewer fractures per 1 mm (0,28 versus 0,81). Lodgepole pine pulp has high resistance to refining and requires increased energy consumption for refining. The nature of changes in the fractional composition along the length, width and fiber shape factor, as well as the structural and dimensional properties of lodgepole pine cellulose depends fundamentally on the lignin content. Fibers with a low lignin content are more easily destroyed at defect sites, and the remaining fragments have increased straightness. As a result, the refining effect changes from predominant fibrillation and a slight increase in fines for cellulose fibers for cardboard, to predominant chopping of fibers, which passes mainly along the sections of the cell wall weakened by fractures, and the previously bent end sections of the fibers are torn off. At the same time, the rate of decrease in fiber length increases, and the direction of change in the structural and dimensional properties during refining changes, the content of fines, the number of breaks per fiber and the average length of the segment change in different directions. The differences in fiber properties measured on the automatic fiber analyzer L&W Fiber Tester are characterized in pulp samples with high (Kappa number 56) and low (Kappa number 25) lignin content. It has been shown that with a decrease in the lignin content in pulp, the average fiber length decreases from 2,1 to 1,9 mm, the average width from 31,4 to 30,1 μ m, the form factor from 89,2 to 82,1 %, and the number of kinks per 1 mm increases from 0,28 to 0,81. It was revealed that the nature of the change in the fractional composition by length, width and fiber shape factor, as well as the structural and dimensional properties of pulp from lodgepole pine during refining depends fundamentally on the lignin content. It has been established that fibers with a low lignin content are more easily destroyed when refined at defect sites, and the remaining fragments have increased straightness. The change in the milling effect is shown from predominant fibrillation and a slight increase in fines for fibers with a high lignin content to predominant chopping of fibers with a low lignin content. With a decrease in lignin content, the rate of decrease in fiber length during refining increases, and the direction of change in structural and dimensional properties changes.

Keywords: Lodgepole pine, introduction, fibers, kraft pulp, structural and morphological properties, fractional composition

Suggested citation: Kazakov Ya.V., Babich N.A., Krushevskaya N.A. *Izmenenie strukturno-morfologicheskikh svoystv sul'fatnoy tsellyulozy iz drevesiny introdutsirovannoy sosny skruchennoy pri razmole* [Kraft pulp structural and morphological property changes produced from refined introduced Lodgepole pine wood]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 5, pp. 153–165. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-153-165


References

- [1] Melekhov I.S. *Introduktsiya khvoynykh v lesnom khozyaystve* [Introduction of conifers in forestry]. *Russian J. of Forest Science* [Lesovedenie], 1984, no. 6, pp. 72–78.
- [2] Bäcklund S. *The Introduction of Pinus contorta in Sweden. Implications for forest diversity: Doctoral Thesis Swedish University of Agricultural Sciences Uppsala / Sofia Bäcklund. SLU Service/Repro, Uppsala, 2016, 56 p.*
- [3] Drozdov I.I., Aleksandrova M.S., Rumyantsev D.E. *Vliyaniye klimaticheskikh faktorov na radial'nyy prirost sosny kedrovoy sibirskoy (Pinus Sibirica Du Tour): v usloviyakh Glavnogo botanicheskogo sada RAN* [Influence of climatic factors on the radial growth of Siberian stone pine (Pinus Sibirica Du Tour.) in the conditions of the Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences]. *Byulleten' Glavnogo botanicheskogo sada* [Bulletin of the Main Botanical Garden], 2008, no. 194, pp. 56–60.
- [4] Jansons A., Sisenis L., Neimane U., Rieksts-Riekstins J. *Biomass production of young lodgepole pine (Pinus contorta var. latifolia) stands in Latvia*. *iForest — Biogeosciences and Forestry*, 2013, v. 6, iss. 1, pp 10–14. DOI: <https://doi.org/10.3832/ifer0637-006>
- [5] Poluboyarinov O.I., Fedorov R.B. *Obosnovaniye vybora drevesnykh porod pri vyrashchivaniy drevesiny kak syr'ya dlya tsellyulozno-bumazhnoy promyshlennosti* [Justification of the choice of tree species when growing wood as raw material for the pulp and paper industry]. *Lesovodstvo, lesnye kul'tury i pochvovedeniye* [Silviculture, forest crops and soil science]. Leningrad: LTA, 1990, pp. 63–67.
- [6] Knight D. H., Baker W. L., Engelmark O., Nilsson C. *A landscape perspective on the establishment of exotic tree plantations: Lodgepole pine (Pinus contorta) in Sweden*. *Forest Ecology and Management* 2001, v. 141(1–2), pp. 131–142.
- [7] Sable I., Grinfelds U., Jansons A., Vikele L., Irbe I., Verovkins A., Treimanis A. *Comparison of the properties of wood and pulp fibers from lodgepole pine (Pinus contorta) and scots pine (Pinus sylvestris)*. *Pine wood and fibers. BioResources*, 2012, v. 7(2), pp. 1771–1783.

- [8] Bäcklund S., Jönsson M.T., Strengbom J., Göran T. Tree and stand structure of the non-native *Pinus contorta* in relation to native *Pinus sylvestris* and *Picea abies* in managed forests in boreal Sweden. *Scandinavian J. of Forest Research*, 2018, v. 33, iss. 3, pp. 245–254. DOI: 10.1080/02827581.2017.1364785
- [9] Pinyagina N.B. *Obzor i analiz statisticheskoy informatsii o deyatel'nosti tsellyulozno-bumazhnoy promyshlennosti za 3 kvartala 2021 goda* [Review and analysis of statistical information on the activities of the pulp and paper industry for 3 quarters of 2021]. *Packaging R&D*, 2022, no. 1 (45), p. 4.
- [10] Kononov G.N., Verevkin A.N., Serdyukova Ju.V., Zhukova V.A. *Drevesina kak khimicheskoe syr'e. Istoriya i sovremennost'. IV. Delignifikatsiya drevesiny kak put' polucheniya tsellyulozy. Chast' II* [Wood as chemical raw material. History and modernity. IV. Wood delignification as a way to produce cellulose. Part II]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 2, pp. 69–84. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-2-69-84
- [11] Bryntsev V.A., Lavrenov M.A. *Otsenka rezul'tatov introduktsii vidov roda Larix Mill. v tsentr evropeyskoy chasti Rossii* [Evaluation of the results of the introduction of species of the genus Larix Mill. to the center of the European part of Russia]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Conifers of the boreal zone], 2019, v. XXXVII, no. 6, pp. 385–395.
- [12] Bratilova N.P., Konovalova D.A., Nechaeva D.A., Aleksievich E.G. *Biologicheskaya produktivnost' bokovykh pobegov derev'ev sosny kedrovoy sibirskoy raznykh form* [Biological productivity of lateral shoots of Siberian cedar pine trees of different forms]. *Plodovodstvo, semenovodstvo, introduktsiya drevesnykh rasteniy* [Fruit growing, seed production, introduction of woody plants], 2018, v. 21, pp. 46–48.
- [13] Nakvasina E.N., Prozherina N.A. Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) reaction to climate change in the provenance tests in the north of the Russian plain. *Folia Forestalia Polonica, Series A*, 2021, t. 63, no. 2, pp. 138–149.
- [14] Elfving B., Ericsson T., Rosvall O. The introduction of lodgepole pine for wood production in Sweden — a review. *Forest Ecology and Management*, 2001, no. 141, pp. 15–29.
- [15] Dāble I., Grīnfelds U., Jansons Ā., Vītele L., Irbe I., Verovkins A., Bāders E., Treimanis A. Suitability of Scots pine (*Pinus sylvestris*) and lodgepole pine (*Pinus contorta*) wood for paper production: Comparative analysis. *Mēpzinātne*, 2012, no. 26(59), pp. 155–166 (in Latvian with English abstract).
- [16] Stafeev B.L. *Severoamerikanskaya sosna skruchennaya — perspektivnaya poroda dlya introduktsionnogo ispytaniya v Arkhangel'skoy oblasti* [North American lodgepole pine is a promising species for introduction testing in the Arkhangelsk region]. *Voprosy introduktsii khozyaystvenno tsennykh drevesnykh porod na Evropeyskiy Sever* [Issues of introduction of economically valuable tree species to the European North]. *Arkhangel'sk: AILiLH*, 1989, pp. 35–43.
- [17] Alekseev V.M., Zhigunov A.V., Bondarenko A.S., Burtsev D.S. *Introduktsiya sosny skruchennoy v usloviyakh Leningradskoy oblasti* [Introduction of lodgepole pine in the Leningrad region]. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*, 2014, no. 3, pp. 24–33.
- [18] Korzhagov S.A., Gribov S.E., Smirnov A.V., Khamitov R.S., Shchekalev R.V. *Vliyanie tipa usloviy mestoproizrastaniya i geograficheskogo polozheniya populyatsiy na stepen' introgressivnoy gibridizatsii eli v Vologodskoy oblasti* [Influence of the type of habitat conditions and geographical location of populations on the degree of introgressive hybridization of spruce in the Vologda region]. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information], 2020, no. 4, pp. 94–104.
- [19] Gutiy L.N., Fedorkov A.L. *Eksperimental'nye kul'tury sosny skruchennoy v Syktyvkar'skom lesnichestve respubliki Komi* [Experimental cultures of lodgepole pine in the Syktyvkar forestry of the Komi Republic]. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*, 2016, no. 1, pp. 48–54.
- [20] Fedorkov A.L., Turkin A.A. *Eksperimental'nye kul'tury sosny skruchennoy v Respublike Komi* [Experimental cultures of lodgepole pine in the Komi Republic]. *Russian J. of Forest Science [Lesovedenie]*, 2010, no. 1, pp. 70–74.
- [21] Demidova N.A., Durkina T.M., Gogoleva L.G., Demidenko S.A., Bykov Yu.S., Paramonov A.A. *Rost i razvitie sosny skruchennoy (Pinus contorta Loud. var. latifolia S. Wats) v usloviyakh severnoy taygi* [Growth and development of lodgepole pine (*Pinus contorta* Loud. var. *latifolia* S. Wats) in the northern taiga]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva* [Proceedings of the St. Petersburg Forestry Research Institute], 2016, no. 2, pp. 45–59.
- [22] Raevskiy B.V., Mordas' A.A. *Khod rosta kul'tur sosny skruchennoy v podzone sredney taygi* [Growth course of lodgepole pine crops in the middle taiga subzone]. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*, 2005, no. 1–2, pp. 23–33.
- [23] Feklistov P.A., Biryukov S.Yu., Fedyaev A.L. *Sravnitel'nye ekologo-biologicheskie osobennosti sosny skruchennoy i obyknovennoy v severnoy podzone evropeyskoy taygi* [Comparative ecological and biological features of lodgepole and Scots pine in the northern subzone of the European taiga]. *Arkhangel'sk: Publishing house of Arkhangelsk State Technical University*, 2008, 118 p.
- [24] Babich N.A., Khamitov R.S., Andronova M.M. *Stupenchataya introduktsiya drevesnykh rasteniy na severe Russkoy ravniny* [Stepwise introduction of woody plants in the north of the Russian Plain]. *Arkhangel'sk: Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov*, 2021, 412 p.
- [25] Nilov V.N., Pavlova M.A., Stafeev B.L. *O kachestve drevesiny severoamerikanskoy sosny skruchennoy na Evropeyskom Severe* [On the quality of North American twisted pine wood in the European North]. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*, 1987, no. 3, pp. 56–60.
- [26] Heiðarsson L., Pukkala T., Snorrason A. Individual-tree growth models for lodgepole pine (*Pinus contorta*) in Iceland. *Icelandic Agricultural Sciences*, 2023, no. 36, pp. 81–93.
- [27] Zhu J.Y., Vahey D.W., Scott C.T., Myers G.C. Effect of tree-growth rate on papermaking fiber properties. *Appita J.*, 2008, v. 61, no. 2, pp. 141–155.
- [28] Lebedev I.V., Kazakov Ya.V. *Kharakteristika strukturno-razmernykh svoystv volokon khvoynoy sul'fatnoy tsellyulozy s primeneniem statisticheskogo modelirovaniya* [Characteristics of the structural and dimensional properties of coniferous sulfate cellulose fibers using statistical modeling]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Conifers of the boreal zone], 2016, v. XXXVII, no. 5–6, pp. 333–337.
- [29] Zeng X., Retulainen E., Heinemann S., Fu S. Fibre deformations induced by different mechanical treatments and their effect on zero-span strength. *Nordic Pulp and Paper Research J.*, 2012, v. 27(2), pp. 335–342.
- [30] Kang K.-Y., Zhang S.Y., Mansfield S.D. The effects of initial spacing on wood density, fibre and pulp properties in jack pine (*Pinus Banksiana* Lamb.). *Holzforchung*, 2004, v. 58, pp. 455–463.

- [31] Alashkevich Yu.D., Severgin V.A., Reshetova N.S., Voronin I.A. *Sovremennyye napravleniya v oblasti issledovaniya protsessa razmola voloknistykh materialov* [Modern trends in the field of research into the grinding process of fibrous materials]. *Molodye uchenye v reshenii aktual'nykh problem nauki* [Young scientists in solving urgent problems of science]. Krasnoyarsk: Siberian State University named after M.F. Reshetnev, 2021, pp. 246–248.
- [32] Gharehkhani S., Sadeghinezhad E., Kazi S.N., Yarmand H., Badarudin A., Safaei M.R., Zubir M.N.M. Basic effects of pulp refining on fiber properties — A review. *Carbohydrate Polymers*, 2015, v. 115, pp. 785–803. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.08.047>
- [33] Chen T., Xie Y., Wei Q., Wang X. (Alice), Hagman O., Karlsson O., Liu J. Effect of Refining on Physical Properties and Paper Strength of *Pinus massoniana* and China Fir Cellulose Fibers. *BioResources*, 2016, v. 11(3). DOI: 10.15376/biores.11.3.7839-7848
- [34] Sable I., Grinfelds U., Vikele L., Rozenberga L., Zeps M., Neimane U., Jansons A. Effect of Refining on the Properties of Fibres from Young Scots (*Pinus Sylvestris*) and Lodgepole Pines (*Pinus Contorta*). *Baltic Forestry*, 2017, v. 23(2), pp. 529–533.
- [35] Ushakov A.V., Alashkevich Yu.D., Kozhukhov V.A., Kovalev V.I. *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy sovershenstvovaniya protsessa razmola voloknistykh polufabrikatov vysokoy kontsentratsii (obzor)* [Current state and prospects for improving the grinding process of high-concentration fibrous semi-finished products (review)]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw materials], 2020, no. 4, pp. 315–329. DOI 10.14258/jcprm.2020048251
- [36] Yurtaeva L.V., Alashkevich Yu.D., Kaplev E.V., Vasil'eva D. Yu., Slizikova E.A. *Analiz dvizheniya potoka voloknistoy suspenzii v razmalyvayushchey ustanovke pri poluchenii melkodispersnoy tsellyulozy* [Analysis of the flow of fibrous suspension in a grinding unit during the production of finely dispersed cellulose]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw materials], 2023, no. 3, pp. 317–327. DOI: 10.14258/jcprm.20230312008
- [37] Robertsen L., Joutsimo O. The effect of mechanical treatment on kraft pulps produced from different softwood raw materials. *Paperi ja Puu/Paper and Timber*, 2005, v. 87(2), pp. 111–115.
- [38] Joutsimo O., Robertsen, L. The effect of mechanical treatment on kraft pulp fibers. *Pulp and fiber properties*. *Paperi ja Puu/Paper and Timber*, 2004, v. 86(5), pp. 359–364.
- [39] Li B., Bandekar R., Zha Q., Alsaggaf A., Ni Y. Fiber Quality Analysis: OpTest Fiber Quality Analyzer versus L&W Fiber Tester. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2011, v. 50, pp. 12572–12578. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/ie201631q>
- [40] Kazakov Ya.V., Korel'skaya E.A. *Tekhnologiya rasshirennoy sravnitel'noy kharakteristiki strukturno-razmernykh svoystv voloknistykh polufabrikatov po dannym avtomaticheskogo analizatora volokna* [Technology of extended comparative characteristics of the structural and dimensional properties of fibrous semi-finished products according to the data of an automatic fiber analyzer]. *Problemy mekhaniki tsellyulozno-bumazhnykh materialov: Mater. VII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. imeni professora V.I. Komarova* [Problems of mechanics of pulp and paper materials: Proc. VII Int. scientific-technical. conf. named after professor V.I. Komarova], Arkhangelsk, September 14–16, 2023. Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. Arkhangelsk: NArFU, 2023, pp. 31–37.
- [41] Krushevskaya N.A., Kazakov Ya.V., Okulova E.O., Babich N.A. *Svoystva sul'fatnoy tsellyulozy iz drevesiny introdutsirovannoy sosny, vyrashchennoy v usloviyakh evropeyskogo Severa* [Properties of sulfate cellulose from introduced pine wood grown in the conditions of the European North]. *Fizikokhimiya rastitel'nykh polimerov* [Physicochemistry of plant polymers]. Proc. X int. conf. June 26–29, 2023. Arkhangelsk: Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 2023, pp. 121–124.
- [42] Ferritsius O., Ferritsius R., Rundlof M. Average fibre length as a measure of the amount of long fibres in mechanical pulps — ranking of pulps may shift. *Nord. Pulp Pap. Res. J.*, 2018, v. 33, no. 3, pp. 468–481. DOI: 10.1515/npprj-2018-3058

Authors' information

Kazakov Yakov Vladimirovich  — Dr. Sci. (Engineering) Professor of the Department of pulp and paper and wood chemical production, of the Higher School of Natural Sciences and Technologies, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (NArFU), j.kazakov@narfu.ru

Babich Nikolay Alekseevich — Dr. Sci. (Agriculture), Professor of the Department of Landscape Architecture and Artificial Forests of the Higher School of Natural Sciences and Technologies, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (NArFU), n.babich@narfu.ru

Krushevskaya Natal'ya Andreevna — Master student of the Department of the Department of pulp and paper and wood chemical production, of the Higher School of Natural Sciences and Technologies, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (NArFU), n.krushevskaya@narfu.ru

Received 07.03.2024.

Approved after review 27.06.2024.

Accepted for publication 22.08.2024.

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



Первый вице-премьер Денис Мантуров поздравил работников лесного комплекса с профессиональным праздником

«Поздравляю вас с профессиональным праздником — Днем работников леса!

Россия — лесная держава, и сегодня мы видим, что российская лесоперерабатывающая промышленность — это сильная, сформировавшаяся отрасль, способная адаптироваться к любым вызовам.

Успешно были преодолены сложности 2022–2023 годов, увеличиваются поставки продукции на внутренний рынок, создаются условия для масштабирования применения деревянных конструкций в индустриальном коттеджном и многоэтажном домостроении. Динамично развиваются мебельная индустрия, производство упаковки, где российские производители уверенно занимают ниши ушедших западных компаний, обеспечивая наших граждан продукцией достойного качества. Развитие мощностей по глубокой переработке древесины, их модернизация и техническое перевооружение, производство конкурентоспособной продукции с высокой добавленной стоимостью — актуальные задачи, которые отрасль решает сегодня при поддержке государства.

Профессионализм, преданность делу и открытость инновациям работников лесного комплекса дают основания не сомневаться в успехе самых амбициозных отраслевых проектов. Желаю вам удачи, исполнения намеченных планов, крепкого здоровья и благополучия!»

Пресс-служба Рослесхоза