

ЛЕСНОЙ ВЕСТНИК / FORESTRY BULLETIN

Научно-информационный журнал

№ 2 ' 2025 Том 29

Главный редактор

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

Редакционный совет

Артамонов Дмитрий Владимирович, д-р техн. наук, профессор, Пензенский ГУ, Пенза

Ашраф Дарвиш, ассоциированный профессор, факультет компьютерных наук, Университет Хелуан, Каир, Египет, Исследовательские лаборатории Machine Intelligence (MIR Labs), США

Беляев Михаил Юрьевич, д-р техн. наук, начальник отдела, зам. руководителя НТЦ РКК «Энергия» им. С.П. Королёва, Москва

Бемманн Альбрехт, профессор, Дрезденский технический университет, Институт профессуры для стран Восточной Европы, Германия

Бессчетнов Владимир Петрович, д-р биол. наук, профессор, Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия, Нижний Новгород

Бугаёв Александр Степанович, академик РАН, д-р физ.-мат. наук, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва

Бурмистрова Ольга Николаевна, д-р техн. наук, профессор, Ухтинский государственный технический университет

Говедар Зоран, член-корреспондент Академии наук и искусств Республики Сербской (АНИРС), профессор, доктор с.-х. наук, Университет г. Баня Лука, Республика Сербская, Босния и Герцеговина

Деглиз Ксавье, д-р с.-х. наук, профессор, Академик IAWS, академик Французской академии сельского хозяйства, Нанси, Франция

Драпалюк Михаил Валентинович, д-р техн. наук, профессор, ректор ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, Воронеж

Евдокимов Юрий Михайлович, канд. хим. наук, профессор, академик Нью-Йоркской академии наук, чл.-корр. РАН, член центрального

правления Нанотехнологического общества России, Москва

Залесов Сергей Вениаминович, д-р с.-х. наук, профессор, УГЛТУ, Екатеринбург

Запруднов Вячеслав Ильич, д-р техн. наук, профессор, МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Иванкин Андрей Николаевич, д-р хим. наук, профессор, академик МАНВШ, МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

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

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

Ковачев Атанас, д-р архитектуры, профессор, член-корр. Болгарской АН, профессор Международной Академии Архитектуры, Иностраный член Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Почетный профессор

Московского архитектурного института (Государственной академии), Варненский свободный университет им. «Черноризца Храбра», Варна, Болгария.

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

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

Котиев Георгий Олегович, д-р техн. наук, профессор, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

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

планирования университета, Копенгаген, Дания

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

Лу Хайбао, д-р, профессор, заместитель директора Национальной ключевой лаборатории науки и технологий по передовым композициям в особых условиях, Харбинский политехнический университет, Китай

Лукина Наталья Васильевна, член-корреспондент РАН, профессор, директор ЦЭПЛ РАН, зам. Председателя Научного

совета по лесу РАН, Москва

Макуев Валентин Анатольевич, д-р техн. наук, доцент, МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Малашин Алексей Анатольевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Мартынюк Александр Александрович, академик РАН, д-р с.-х. наук, ФБУ ВНИИЛМ, Москва

Мелехов Владимир Иванович, д-р техн. наук, профессор, академик РАН, САФУ им. М.В. Ломоносова, Архангельск

Моисеев Александр Николаевич, ст. науч. сотр., Европейский институт леса, г. Йозенсуу, Финляндия

Наквасина Елена Николаевна, д-р с.-х. наук, профессор, Северный (Арктический) федеральный университет

им. М.В. Ломоносова, Высшая школа естественных наук и технологий, Архангельск

Нимц Петер, д-р инж. наук, профессор физики древесины, Швейцарская высшая техническая школа Цюриха

Павленко Александр Николаевич, член-корреспондент РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт теплофизики имени

С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

Пастори Золтан, д-р техн. наук, доцент, директор Инновационного центра Шопронского университета, Венгрия

Полещук Ольга Митрофановна, д-р техн. наук, профессор, МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Полуэктов Николай Павлович, д-р техн. наук, профессор, МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

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

Теодоронский Владимир Сергеевич, д-р с.-х. наук, профессор, академик РАН, МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Тричков Нено Иванов, профессор, доктор, проректор по научной работе Лесотехнического университета, София, Болгария

Федотов Геннадий Николаевич, д-р биол. наук, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Чубинский Анатолий Николаевич, д-р техн. наук, профессор, СПбГЛТУ, Санкт-Петербург

Чумаченко Сергей Иванович, д-р биол. наук, профессор, МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Шимкович Дмитрий Григорьевич, д-р техн. наук, профессор, ООО «Кудесник», Москва

Щепащенко Дмитрий Геннадьевич, д-р биол. наук, доцент, старший научный сотрудник Международного института

прикладного системного анализа (IIASA), Австрия

Научно-консультативный совет

Козлов Александр Ильич, канд. техн. наук, ученый секретарь Совета ОАО «НПО ИТ», Королёв

Корольков Анатолий Владимирович, д-р физ.-мат. наук, профессор, МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Липаткин Владимир Александрович, канд. биол. наук, профессор, МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Обливин Александр Николаевич, д-р техн. наук, профессор, академик РАН, МАНВШ, заслуженный деятель науки и техники РФ, МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Рыкунин Станислав Николаевич, д-р техн. наук, профессор, МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Стрекалов Александр Федорович, канд. техн. наук, АО «Корпорация Тактическое военное вооружение», Королёв

Титов Анатолий Матвеевич, канд. техн. наук, зам. начальника отделения, ученый секретарь Совета ЦУП ЦНИИМАШ, Королёв

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

Ответственный секретарь Расева Елена Александровна

Редактор Л.В. Сивай

Перевод М.А. Карпухиной

Электронная версия Ю.А. Рязской

Учредитель МГТУ им. Н.Э. Баумана

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи,

информационных технологий и массовых коммуникаций

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-68118 от 21.12.2016

Входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов

соискателей ученых степеней

Материалы настоящего журнала могут быть перепечатаны и воспроизведе-

ны полностью или частично с письменного разрешения издательства

Выходит с 1997 года

Адрес редакции 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 25.03.2025

Тираж 600 экз.

Заказ №

Объем 19,75 п. л.

Цена свободная

LESNOY VESTNIK / FORESTRY BULLETIN

Scientific Information journal

No. 2 ' 2025 Vol. 29

Editor-in-chief

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

Editorial council

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

Makuev Valentin Anatol'evich, Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor, BMSTU (Mytishchi branch), Moscow
Malashin Alexey Anatolyevich, Professor, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow
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)
Pasztor Zoltan, Dr., Ph.D., Director of Innovation Center, University of Sopron, Sopron, Hungary
Pavlenko Aleksandr Nikolaevich, Corresponding Member of the RAS, Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Kutateladze Institute of Thermophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk
Poleshchuk Ol'ga Mitrofanovna, Professor, Dr. Sci. (Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow
Poluektov Nikolai Pavlovich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow
Rodin Sergey Anatol'evich, Professor, the Dr. Sci. (Agric.), ARRISMF, Moscow
Shchepashchenko Dmitry Gennadievich, Associate Professor, Dr. Sci. (Biol.), Senior Researcher, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Austria
Shimkovich Dmitriy Grigor'evich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), OOO «Kudesnik», Moscow
Teodoronskiy Vladimir Sergeevich, Professor, Dr. Sci. (Agric.), academician of the Russian Academy of Natural Sciences, BMSTU (Mytishchi branch), Moscow
Trichkov Neno Ivanov, professor, Dr., Vice-Rector for Research, Forestry University, Sofia, Bulgaria
Zalesov Sergey Veniaminovich, Professor, Dr. Sci. (Agric.), USFEU, Ekaterinburg
Zaprudnov Vyacheslav Il'ich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

Scientific advisory council

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

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 25.03.2025
Circulation 600 copies
Order №
Volume 19,75 p. p.
Price free

СОДЕРЖАНИЕ

БИОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА

Прожерина Н.А., Наквасина Е.Н. Межвидовые и внутривидовые признаки водного режима хвои ели (<i>Picea abies</i> (L.) Karst. × <i>P. obovata</i> (Ledeb.))	5
Белов Л.А., Башегуров К.А., Безденежных И.В., Залесов С.В., Итешина Н.М. Лесоводственная эффективность использования валочно-пакетирующей машины ЛП-19 при проведении чересполосных постепенных рубок в производных березняках	18
Шамсутдинова А.Р., Султанова Р.Р., Мустафин Р.Ф. Выращивание саженцев деревьев рода <i>Populus</i> в горно-лесной зоне Южного Урала	30
Рябуха А.Ф., Кузьмин П.А. Молекулярно-генетический анализ популяций <i>Quercus robur</i> L. на основании полиморфизма ISSR- и SSR-маркеров	42
Селиховкин А.В., Варенцова Е.Ю., Потокин А.Ф., Мусин Х.Г., Мамаев Н.А., Мартирова М.Б. Особенности комплексов вредителей и патогенов в городских насаждениях г. Набережные Челны	55
Федотов Г.Н., Грачева Т.А., Горепекин И.В., Батырев Ю.П. Влияние борьбы с фитопатогенами на эффективность использования сорбционно-стимулирующих препаратов на зерновых культурах	70

ДЕРЕВООБРАБОТКА И ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

Баскаков С.А., Баскакова Ю.В., Жарковская А.В., Красникова С.С., Кабачков Е.Н., Шульга Ю.М. Процедура осветления букового, дубового, кленового и ясеневое шпонов и ее влияние на ИК-спектры	82
Иванкин А.Н., Зарубина А.Н. Биопереработка лигносульфонатов	94
Веровкин А.Н., Кононов Г.Н. Применение продукта биотрансформации листового опада базидиальными грибами	107
Юртаева Л.В. Получение микрокристаллической целлюлозы из однолетних растений с предгидролизным размолом волокнистой массы	120

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Кольниченко Г.И., Тарлаков Я.В., Усачев М.С. Алгоритмизация электрических расчетов систем электроснабжения предприятий лесного комплекса	135
Гранкин А.Ю., Никитин В.В., Сидельников И.Д. Математическая модель плоского горячего прессования бумажно-полимерных плит	147

CONTENTS

BIOLOGICAL AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF FORESTRY

Prozherina N.A., Nakvasina E.N. Interspecific and intraspecific character of spruce needles (<i>Picea abies</i> (L.) Karst. × <i>P. obovata</i> (Ledeb.)) water regime	5
Belov L.A., Bashegurov K.A., Bezdenezhnyh I.V., Zalesov S.V., Iteshina N.M. Feller-buncher LP-19 silvicultural efficiency for alternate strip fellings in secondary growth birch forests	18
Shamsutdinova A.R., Sultanova R.R., Mustafin R.F. Cultivation of seedlings (genus <i>Populus</i>) in Southern Urals mountain-forest zone	30
Ryabukha A.F., Kuz'min P.A. Molecular genetic analysis of <i>Quercus robur</i> L populations based on polymorphism of ISSR- and SSR-markers	42
Selikhovkin A.V., Varentsova E.Yu., Potokin A.F., Musin Kh.G., Mamaev N.A., Martirova M.B. Peculiarities of pest and pathogen complexes in urban plantations of Naberezhnye Chelny city	55
Fedotov G.N., Gracheva T.A., Gorepekin I.V., Batyrev Yu.P. Effect of phytopathogen control on efficiency of sorbent-stimulating preparations on grain crops	70

WOODWORKING AND CHEMICAL WOOD PROCESSING

Baskakov S.A., Baskakova Yu.V., Zharkovskaya A.V., Krasnikova S.S., Kabachkov E.N., Shul'ga Yu.M. Bleaching procedure of beech, oak, maple and ash veneers and its effect on IR spectra	82
Ivankin A.N., Zarubina A.N. Lignosulfonates bioprocessing	94
Verevkin A.N., Kononov G.N. Application of the leaf litter biotransformation product by basidial fungi	107
Yurtaeva L.V. Microcrystalline cellulose production from annual plants with slush prehydrolysis refining	120

MATH MODELING

Kol'nichenko G.I., Tarlakov Ya.V., Usachev M.S. Constructing algorithm of electrical computations for electrical power supply of forestry enterprises	135
Grankin A.Y., Nikitin V.V., Sidelnikov I.D. Mathematical model of paper-polymer board hot plate pressing	147

МЕЖВИДОВЫЕ И ВНУТРИВИДОВЫЕ ПРИЗНАКИ ВОДНОГО РЕЖИМА ХВОИ ЕЛИ (*PICEA ABIES* (L.) KARST. × *P. OBOVATA* (LEDEB.))

Н.А. Прожерина^{1✉}, Е.Н. Наквасина²

¹ФГБУН «Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаврёва Уральского отделения Российской академии наук» (ФИЦКИА УрО РАН), Россия, 163020, г. Архангельск, Никольский пр-кт, д. 20

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

pronad1@yandex.ru

Представлены результаты изучения показателей водного режима однолетней хвои (содержание воды в хвое, уровень реального водного дефицита, скорость водоотдачи изолированной хвои) у 27 происхождений ели сибирской (*Picea obovata* (Ledeb.)), ели европейской (*P. abies* (L.) Karst.) и их межвидовых гибридов в коллекции географических культур Архангельской области (62°54' с. ш., 40°24' в. д.). Выявлена невысокая изменчивость параметров водного обмена хвои у происхождений ели разных видов и исходных мест произрастания. В испытываемой коллекции климатипов ели в большей степени проявляются видовые различия, необусловленные местоположением исходных популяций. Сделан вывод о меньшей экологической пластичности вида ели сибирской по сравнению с елью европейской и интрогрессивными гибридами с ее участием. У менее экологически пластичного вида ели сибирской *P. obovata* (Ledeb.) выявлен несколько повышенный уровень реального водного дефицита и увеличение скорости водоотдачи хвои у происхождений на фоне выровненного уровня содержания воды в хвое. Интрогрессивная гибридизация ели сибирской и европейской привела к изменению позиций, связанных с водным режимом, у их гибридных форм, закрепленных наследственно. Показано, что адаптационная пластичность популяций ели, отличающихся географическим происхождением, и особенность водного режима ее хвои, могут быть связаны с эволюцией вида и историей послеледникового расселения на территории Восточно-Европейской равнины и произрастанием двух видов в зоне интрогрессивной гибридизации — *P. abies* (L.) Karst. и *P. obovata* (Ledeb.) и их гибридных форм.

Ключевые слова: ель сибирская, ель европейская, географические культуры, внутривидовая и межвидовая изменчивость, оводненность, водный дефицит

Ссылка для цитирования: Прожерина Н.А., Наквасина Е.Н. Межвидовые и внутривидовые признаки водного режима хвои ели (*Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* (Ledeb.)) // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 2. С. 5–17. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-2-5-17

Возрастающая концентрация парниковых газов в атмосфере обуславливает существенные глобальные изменения климата и оказывает сильное воздействие на окружающую среду [1]. Особое экологическое значение при этом приобретает способность видов лесобразующих пород развивать устойчивость к этим изменениям благодаря их обширным ареалам, генетическому разнообразию и адаптационному потенциалу [2, 3].

В России для решения проблем лесосеменного районирования в 1970-е годы была создана сеть географических культур. В настоящее время опыты с происхождениями стали основным полигоном для моделирования реакции древесных пород на глобальные изменения климата. Географические культуры дают возможность

изучить краткосрочный отклик основных лесобразующих пород на данные изменения климата с учетом внутривидовых особенностей популяции, позволяют частично устранить фенотипическую вариабельность, вызванную окружающей средой, и изучить взаимодействие генотипа и окружающей среды в фенотипической реакции вида на воздействие окружающей среды [4, 5].

Особенность географических опытов с елью в России заключается в произрастании двух видов ели — *Picea abies* (L.) Karst. и *P. obovata* (Ledeb.) на востоке ее европейского ареала, расселение которых связано с исторической миграцией в послеледниковый период. Эти два вида часто взаимодействовали и гибридизировались [6, 7]. В области соприкосновения их ареалов выделяется зона интрогрессивной гибридизации [8]. Однако при изучении популяционного разнообразия в лесоводственных

целях современные исследователи [9] рассматривают ель, произрастающую на Восточно-Европейской равнине, с точки зрения изменчивости одного комплексного вида (*Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* (Ledeb.)).

Ель по сравнению с лиственными породами и пихтой более чувствительна к воздействию сильной засухи, хотя способна также переносить умеренную засуху, как и лиственные породы [10]. Устойчивость растений к недостатку почвенной влаги обусловлена наследственно [11–13], у хвойных пород летом она выше, чем весной. Зимой водоудерживающая способность хвои повышается преимущественно вследствие изменения агрегатного состояния протоплазмы мезофилла хвои в результате изменения структуры и свойств коллоидов протоплазмы [14]. Увеличение или уменьшение водного дефицита в хвое может быть следствием изменения гидрофильности сухого вещества [15]. Адаптационные способности видов к условиям окружающей среды можно оценить по изменчивости критерия содержания воды в ассимиляционном аппарате [16]. Уровень испытываемого водного дефицита, т. е. разницы в содержании воды между донасыщенным листом и листом в природных условиях, обусловлен способностью листьев поглощать воду главным образом благодаря наличию низкомолекулярных веществ [17, 18] и образованию комплексов белковой и небелковой природы, что, по сути, регулирует соотношение связанной и свободной воды в клетке [19]. Потеря клетками половины общего содержания воды близка к пороговым значениям уровня обезвоженности. Этот показатель — критерий t_{50} — М.М. Котов [12] предложил использовать в качестве критерия стабильности оводненности тканей растения.

Ель европейская обладает высокой фенотипической пластичностью, что позволяет ей компенсировать рост и развитие в стрессовых условиях жаркого и засушливого лета вследствие более длительного вегетационного периода весной и осенью [20]. Ранее нами были показаны существенные различия в отклике роста различных видов ели на изменения условий произрастания, меньшая экологическая пластичность ели сибирской по сравнению с елью европейской, что связано, вероятно, с историей расселения этих двух видов в послеледниковом периоде [21–23].

Цель работы

Цель работы — выявление особенностей межвидовой и внутривидовой изменчивости водного режима хвои ели (*Picea abies* (L.)

Karst. × *P. obovata* (Ledeb.)), произрастающей в 39-летних географических культурах Архангельской области.

Объекты и методы исследования

Объектом исследований послужили географические культуры ели, расположенные в Плесецком районе Архангельской области (62°54' с. ш., 40°24' в. д.) [24]. Культуры были заложены в 1977 г. Территория относится к подзоне средней тайги с умеренно-континентальным климатом. Куратор географических культур — Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства (ФБУ «СевНИИЛХ», г. Архангельск).

Для изучения водного режима хвои ели были исследованы 27 происхождений ели в возрасте 39 лет. Вид ели и гибридную форму определяли по форме семенных чешуй шишек материнских насаждений [8], отраженную в паспортах государственной регистрации географических культур, и уточняли по шишкам, появившимся в потомстве.

В анализ была взята однолетняя хвоя ели у 20 деревьев каждого происхождения (табл. 1).

В ходе анализа коллекции рассматривалось место произрастания исходных насаждений относительно зон/подзон лесорастительного районирования [25]. Реальный водный дефицит (РВД) определяли как разность между содержанием воды в изолированной донасыщенной хвое и содержанием воды в хвое в момент определения [26]. Водоудерживающую способность хвои характеризовали по скорости водоотдачи изолированной хвои и оценивали по количеству потерянной воды за 24 и 48 ч, и критериям t_{40} и t_{50} — времени потери 40 и 50 % воды [12]. Для возможности оценить внутривидовую изменчивость водного режима хвои ели в коллекции географических культур рассматриваемые показатели были выражены в единицах стандартного отклонения и распределены на четыре группы: I — ниже $-0,5$; II — $-0,5 \dots 0$; III — $0 \dots 0,5$; IV — выше $0,5$. При статистическом анализе данных использовали корреляционный [27] и однофакторный дисперсионный методы анализа. Уровень изменчивости показателей оценивали по С.А. Мамаеву [28].

Результаты и обсуждение

У исследованных климатипов ели *содержание воды в хвое* составляло от 37,3 у климатипа ели № 27 происхождением из Костромской области до 62,3 % у климатипа № 28 из Кировской области (табл. 2, 3).

Т а б л и ц а 1

Характеристика местоположения и климатических условий происхождений ели в географических культурах Архангельской области (в соответствии с Реестром государственной регистрации географических культур)

Characteristics of location and climatic conditions of spruce origin in provenance trials of the Arkhangelsk region (according to the Register of State Registration of Geographical Crops)

Номер кли-маги-па	Местоположение	Лесорастительная зона/подзона [25]	Географические координаты	Длительность вегетационного периода, сут.	Средне-годовая температура, °С	Сумма температур выше +5 °С	Годовая сумма осадков, мм
<i>Ель сибирская (Picea obovata (Ledeb.))</i>							
1	Мурманская обл., Мончегорский р-н	Северная подзона тайги	67°51' с. ш. 32°57' в. д.	90	-1,5	1220	460
20	Архангельская обл., Пинежский р-н	То же	64°45' с. ш. 43°14' в. д.	137	0,4	1660	510
23	Архангельская обл., Холмогорский р-н	«→»	64°14' с. ш. 41°38' в. д.	137	0,4	1660	510
25	Республика Коми, Корткеросский р-н	Средняя подзона тайги	61°41' с. ш. 51°31' в. д.	141	-0,1	1720	550
26	Республика Коми, Сосногорский р-н	То же	63°27' с. ш. 53°55' в. д.	155	0,4	2000	700
38	Пермский край, Красновишерский р-н	«→»	60°12' с. ш. 57°08' в. д.	155	1,1	2000	800
39	Пермский край, Добрянский р-н	Южная подзона тайги	58°16' с. ш. 56°25' в. д.	155	1,7	2000	500
40	Свердловская обл., Карпинский р-н	Средняя подзона тайги	59°51' с. ш. 60°00' в. д.	150	-0,6	1926	525
41	Свердловская обл., Нижне-Тагильский р-н	Южная подзона тайги	57°54' с. ш. 60°00' в. д.	150	-0,6	1926	525
42	Свердловская обл., Тавдинский р-н	То же	58°04' с. ш. 65°18' в. д.	156	0,7	2106	438
<i>Гибридная ель с преобладанием ели сибирской (Picea obovata (Ledeb.))</i>							
1а	Республика Карелия, Медвежьегорский р-н	Средняя подзона тайги	62°54' с. ш. 34°27' в. д.	150	2,0	1800	600
2	Республика Карелия, Сегежский р-н	То же	63°40' с. ш. 34°23' в. д.	140	1,5	1600	500
19	Архангельская обл., Плесецкий р-н	«→»	62°59' с. ш. 40°24' в. д.	148	1,0	1810	530
22	Архангельская обл., Котласский р-н	«→»	61°15' с. ш. 46°54' в. д.	148	1,0	1810	530
28	Кировская обл., Слободской р-н	Южная подзона тайги	58°49' с. ш. 50°06' в. д.	137	1,3	1800	500
31	Нижегородская обл., Шарангский р-н	Зона смешанных лесов	57°11' с. ш. 46°39' в. д.	170	2,7	2400	325
35	Удмуртская Республика, Ижевский р-н	Южная подзона тайги	56°50' с. ш. 53°10' в. д.	150	2,1	2500	450
<i>Гибридная ель с преобладанием ели европейской (Picea abies (L.) Karst)</i>							
3	Республика Карелия, Пряжинский р-н	Средняя подзона тайги	61°40' с. ш. 33°33' в. д.	150	2,0	1800	600
4	Республика Карелия, Пудожский р-н	То же	61°40' с. ш. 36°40' в. д.	150	2,0	1800	600
24	Вологодская обл., Череповецкий р-н	Южная подзона тайги	59°07' с. ш. 37°57' в. д.	160	2,3	2020	580
27	Костромская обл., Галичский р-н	То же	58°24' с. ш. 42°20' в. д.	160	3,1	2100	500

Окончание табл. 1

Номер климата	Местоположение	Лесорастительная зона/подзона [25]	Географические координаты	Длительность вегетационного периода, сут.	Среднегодовая температура, °С	Сумма температур выше +5 °С	Годовая сумма осадков, мм
29	Московская обл., Солнечногорский р-н	Зона смешанных лесов	56°10' с. ш. 36°58' в. д.	160	3,6	2300	530
Ель европейская (<i>Picea abies</i> (L.) Karst)							
5	Ленинградская обл., Тосненский р-н	Южная подзона тайги	59°30' с. ш. 30°52' в. д.	160	5,0	1900	650
7	Псковская обл., Великолукский р-н	Зона смешанных лесов	56°23' с. ш. 30°30' в. д.	165	5,9	1950	530
8	Эстонская Республика, уезд Вильяндимаа	То же	58°24' с. ш. 25°38' в. д.	180	4,8	2200	600
10	Латвийская Республика, Аугшдаугавский край	«—»	56°10' с. ш. 26°30' в. д.	180	5,3	2500	630
30	Тверская обл., Нелидовский р-н	«—»	56°14' с. ш. 32°48' в. д.	150	3,2	2200	500

Т а б л и ц а 2

Показатели водного обмена хвои ели в географических культурах Архангельской области
Indicators of spruce needles water exchange in the provenance trial in the Arkhangelsk region

Номер климата (см. табл. 1)	Реальный водный дефицит, %	Содержание воды в хвое, %	Критерий, ч		Потери воды, %	
			t_{40}	t_{50}	за 24 ч	за 48 ч
1	18,08 ± 2,44	59,29 ± 5,94	5,30 ± 1,43	10,60 ± 2,85	40,68 ± 10,95	47,62 ± 12,82
1a	10,01 ± 1,25	56,44 ± 2,54	7,70 ± 1,48	14,20 ± 2,73	41,06 ± 7,89	46,63 ± 8,97
2	7,88 ± 3,59	44,85 ± 3,71	7,40 ± 2,07	13,20 ± 3,69	39,27 ± 10,99	47,86 ± 13,39
3	8,75 ± 2,82	50,52 ± 3,00	11,40 ± 3,63	19,10 ± 6,08	33,05 ± 10,51	44,31 ± 14,10
4	9,70 ± 0,49	45,23 ± 2,43	11,20 ± 3,46	19,50 ± 6,02	34,60 ± 10,67	43,12 ± 13,30
5	14,92 ± 1,29	54,46 ± 1,70	13,00 ± 4,02	21,60 ± 6,68	35,01 ± 10,83	43,97 ± 13,60
7	8,62 ± 0,84	51,47 ± 1,17	10,70 ± 4,36	18,20 ± 5,37	37,04 ± 10,93	46,91 ± 13,85
8	13,15 ± 5,76	56,57 ± 4,37	6,80 ± 1,64	12,10 ± 2,92	43,73 ± 10,55	51,18 ± 12,34
10	11,98 ± 0,86	44,94 ± 1,76	9,20 ± 2,87	16,00 ± 4,98	32,62 ± 10,16	45,09 ± 14,04
19	10,34 ± 1,84	47,65 ± 5,41	10,60 ± 2,90	18,20 ± 4,98	33,31 ± 9,12	45,00 ± 12,32
20	12,47 ± 5,20	46,52 ± 1,62	10,10 ± 2,42	17,60 ± 4,22	38,47 ± 9,22	44,73 ± 10,72
22	9,36 ± 1,28	56,21 ± 3,16	15,10 ± 4,74	26,10 ± 8,20	27,72 ± 8,70	37,27 ± 11,70
23	12,44 ± 0,92	54,90 ± 1,06	16,40 ± 3,93	28,70 ± 6,88	36,78 ± 8,81	45,29 ± 10,85
24	12,93 ± 0,44	50,66 ± 4,99	9,90 ± 2,47	17,00 ± 4,24	36,35 ± 9,07	48,28 ± 12,05
25	15,08 ± 2,49	44,73 ± 1,54	12,50 ± 3,66	22,30 ± 6,53	30,35 ± 8,89	42,93 ± 12,57
26	15,65 ± 7,37	49,03 ± 1,85	7,50 ± 1,79	13,30 ± 3,18	35,22 ± 8,43	46,96 ± 11,24
27	15,45 ± 2,62	37,26 ± 1,10	10,20 ± 2,45	18,50 ± 4,44	36,05 ± 8,65	44,50 ± 10,67
28	5,86 ± 0,60	62,32 ± 1,89	8,10 ± 2,00	15,00 ± 3,71	31,43 ± 7,78	37,35 ± 9,24
29	9,57 ± 2,35	53,33 ± 1,46	12,00 ± 3,17	20,30 ± 5,37	31,74 ± 8,39	39,11 ± 10,34
30	11,92 ± 2,20	58,80 ± 3,27	9,90 ± 2,13	17,20 ± 3,71	39,84 ± 8,58	48,51 ± 10,45
31	13,26 ± 1,07	53,96 ± 4,48	10,90 ± 2,57	18,80 ± 4,42	34,87 ± 8,21	43,97 ± 11,42
35	21,92 ± 2,53	51,87 ± 1,16	10,30 ± 2,20	17,20 ± 3,68	37,32 ± 7,99	48,08 ± 9,41
38	11,39 ± 1,88	53,73 ± 2,52	10,00 ± 2,07	17,20 ± 3,57	36,66 ± 7,61	45,11 ± 9,97
39	13,19 ± 4,22	41,15 ± 1,72	9,20 ± 2,21	12,40 ± 2,98	32,80 ± 7,89	39,61 ± 10,85
40	14,81 ± 2,15	45,98 ± 3,65	10,50 ± 2,83	19,30 ± 4,74	32,68 ± 8,03	40,72 ± 9,73
41	8,35 ± 0,67	59,93 ± 6,20	8,70 ± 1,82	15,10 ± 3,15	38,11 ± 7,96	48,94 ± 8,51
42	22,49 ± 7,81	53,31 ± 3,39	5,40 ± 1,02	9,80 ± 1,85	41,77 ± 7,87	52,54 ± 9,22

Т а б л и ц а 3

Общие показатели водного обмена хвои ели в географических культурах Архангельской области

General indicators of spruce needles water exchange in the provenance trials in the Arkhangelsk region

Общие показатели по климатипам	Реальный водный дефицит, %	Содержание воды в хвое, %	Критерий, ч		Потери воды, %	
			t_{40}	t_{50}	за 24 ч	за 48 ч
Среднее значение	12,4	51,1	10,2	17,6	35,7	44,9
Стандартное отклонение	3,9	6,1	2,4	4,2	3,7	3,9
Коэффициент вариации	31,4	12,0	23,9	23,7	10,5	8,6

Т а б л и ц а 4

Коэффициент корреляции показателей водного обмена хвои ели, растущей в географических культурах Архангельской области, с географическими и климатическими характеристиками мест произрастания исходных насаждений

Correlation coefficient of water metabolism parameters of spruce needles growing in the provenance trials in the Arkhangelsk region with geographical and climatic characteristics of the original plantation sites

Географические координаты и климатические показатели исходных насаждений	Показатели водного обмена					
	Содержание воды в хвое, %	Реальный водный дефицит, %	Критерий, ч		Потери воды, %	
			t_{40}	t_{50}	за 24 ч	за 48 ч
Северная широта	-0,106	-0,005	-0,046	0,026	0,228	0,016
Восточная долгота	-0,380	0,329	-0,043	-0,083	-0,182	-0,131
Вегетационный период, сут.	-0,099	-0,089	0,115	0,051	-0,107	0,079
Среднегодовая температура, °С	0,256	-0,171	0,093	0,053	-0,036	0,070
Средняя температура января, °С	0,263	-0,260	0,001	0,016	0,175	0,134
Средняя температура июля, °С	-0,002	0,046	-0,268	-0,331	-0,045	0,037
Сумма температур выше +5, °С	0,056	0,249	0,051	-0,016	-0,111	0,104
Среднегодовое количество осадков, мм	-0,131	-0,219	0,042	0,037	0,026	0,004
Гидротермический коэффициент	-0,260	-0,219	0,066	0,106	0,240	0,192
Континентальность климата, %	0,001	0,289	0,058	-0,028	-0,370	-0,237

Примечание. Полу жирным шрифтом выделены коэффициенты значимые при уровне выше 0,05.

Достоверного влияния климатических характеристик места происхождения климатипа, как и лесорастительной подзоны, выявлено не было ни корреляционным (табл. 4), ни однофакторным дисперсионным методом анализа.

Разные виды ели практически не различались по содержанию воды в хвое. Данные по группам, где значения оводненности хвои выражены в единицах стандартного отклонения (табл. 5, рисунок), свидетельствуют о достаточно равномерном распределении по группам I–IV изученных климатипов.

Отсутствие зависимости оводненности хвои от вида ели подтверждается и результатами, полученными в ходе однофакторного дисперсионного анализа влияния вида ели на оводненность хвои ($F = 2,56$, $P = 0,078$). Коэффициент изменчивости содержания воды в хвое ели со-

ставлял 11 % (см. табл. 2), что характеризует коллекцию ели в географических культурах как выровненную по показателю оводненности хвои. Это, вероятно, происходит вследствие произрастания географических культур ели в благоприятных для вида условиях водообеспеченности в Архангельской области.

В целом наибольший *дефицит воды* испытывали происхождения ели сибирской. У этих же происхождений чаще всего встречается показатель РВД IV группы, выраженный в единицах стандартного отклонения (см. табл. 5). Ель из Архангельской области, в частности, местного плесецкого (№ 19) и котласского (№ 22) происхождений, наряду с елью из Карелии (климатипы № 1а, 2–4) не испытывают водного дефицита, относятся к группе I, вероятнее всего, по причине произрастания материнских

Т а б л и ц а 5

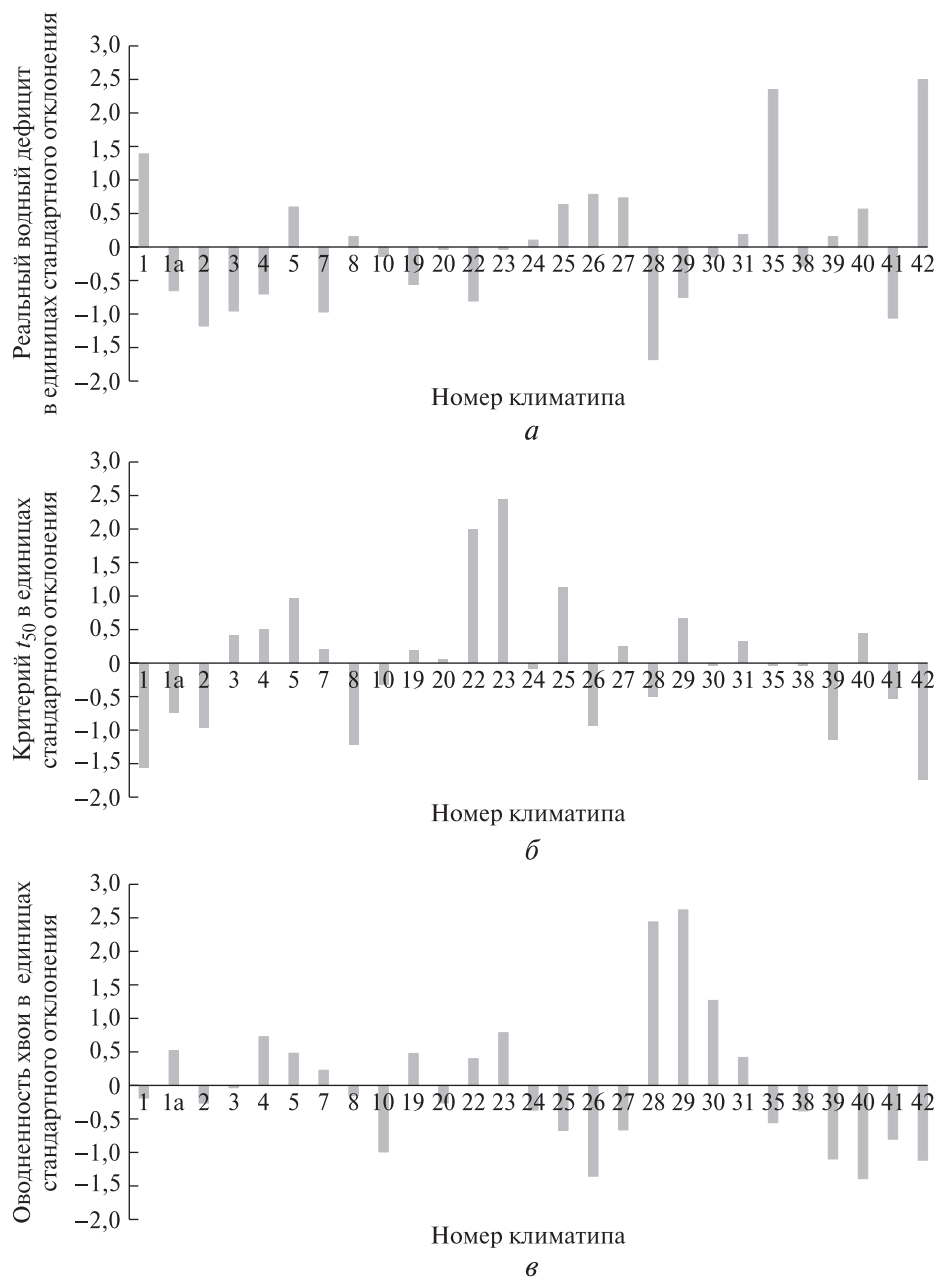
Группы по показателям водного режима хвои ели, произрастающей в географических культурах Архангельской области, выраженным в величинах стандартного отклонения
Groups according to water regime indicators of spruce needles growing in provenance trials of the Arkhangelsk region, expressed in standard deviation values

Номер климатического типа (см. табл. 1)	Местоположение	Реальный водный дефицит, %	Содержание воды в хвое в насаждениях, %	Критерий, ч		Потери воды, %	
				t_{40}	t_{50}	24 ч	48 ч
Зона с господством популяций ели сибирской (<i>Picea obovata</i> (Ledeb.))							
1	Мурманская обл., Мончегорский р-н	IV	IV	I	I	IV	IV
20	Архангельская обл., Пинежский р-н	II	I	II	III	II	III
23	Архангельская обл., Холмогорский р-н	II	IV	IV	IV	IV	III
25	Республика Коми, Корткеросский р-н	IV	I	IV	IV	I	II
26	Республика Коми, Сосногорский р-н	IV	II	I	I	III	IV
38	Пермский край, Красновишерский р-н	II	III	II	II	III	III
39	Пермский край, Добрянский р-н	III	I	II	I	I	I
40	Свердловская обл., Карпинский р-н	IV	I	III	III	I	I
41	Свердловская обл., Нижне-Тагильский р-н	I	IV	I	I	IV	IV
42	Свердловская обл., Тавдинский р-н	IV	III	I	I	IV	IV
Зона с господством популяций гибридной ели с преобладанием ели сибирской (<i>Picea obovata</i> (Ledeb.))							
1a	Республика Карелия, Медвежьегорский р-н	I	IV	I	I	IV	III
2	Республика Карелия, Сеgezский р-н	I	I	I	I	IV	IV
19	Архангельская обл., Плесецкий р-н	I	I	III	III	II	III
22	Архангельская обл., Котласский р-н	I	IV	IV	IV	I	I
28	Кировская обл., Слободской р-н	I	IV	I	I	I	I
31	Нижегородская обл., Шарангский р-н	II	III	III	III	II	II
35	Удмуртская Республика, Ижевский р-н	IV	III	II	II	III	IV
Зона с господством популяций гибридной ели с преобладанием ели европейской (<i>Picea abies</i> (L.) Karst)							
3	Республика Карелия, Пряжинский р-н	I	II	III	III	II	II
4	Республика Карелия, Пудожский р-н	I	I	III	III	III	II
24	Вологодская обл., Череповецкий р-н	II	II	II	II	III	IV
27	Костромская обл., Галичский р-н	IV	I	III	III	II	II
29	Московская обл., Солнечногорский р-н	I	III	IV	IV	I	I
Зона с господством популяций ели европейской (<i>Picea abies</i> (L.) Karst)							
5	Ленинградская обл., Тосненский р-н	III	IV	IV	IV	II	II
7	Псковская обл., Великолукский р-н	I	III	III	III	III	IV
8	Эстонская Республика, уезд Вильяндимаа	II	IV	I	I	IV	IV
10	Латвийская Республика, Аугшдаугавский край	II	I	II	II	II	III
30	Тверская обл., Нелидовский р-н	II	IV	II	II	III	IV

насаждений в благоприятных условиях водообеспеченности, их водный режим максимально адаптирован к данным условиям.

Показатель скорости водоотдачи рассматривается в качестве критерия отбора и метода диагностики по неблагоприятным факторам окружающей среды [29–31]. В проведенных нами исследованиях изменчивость показателя скорости потери воды в течение 1 и 2 сут. была невысокой — коэффициент изменчивости не превышал 10 %, и значения этих показателей колебались в пределах 28...41 % за 24 ч экс-

перимента и 37...52 % — за 48 ч (см. табл. 2). Какой-либо статистически значимой взаимосвязи скорости водоотдачи за 1 и 2 сут. эксперимента с климатическими характеристиками мест произрастания исходных происхождений, видом и гибридной формой ели, а также лесорастительной подзоны мест произрастания материнских насаждений выявлено не было. В то же время использование критериев t_{40} и t_{50} показало, что наименьший период достижения критического уровня обезвоженности наблюдался у происхождений ели сибирской —



Показатели водного режима хвои ели, выраженные в единицах стандартного отклонения, в географических культурах Архангельской области: а — реальный водный дефицит; б — критерий t_{50} ; в — оводненность хвои

Water exchange parameters of spruce needles in the provenance trials in the Arkhangelsk region expressed in standard deviation values: а — real water deficit; б — t_{50} criterion; в — water content of needles

у мурманского (№ 1) и свердловского (№ 42) климатипов. Их генотип сформировался в условиях недостатка годовой суммы осадков (см. табл. 1), количество которых было минимальным среди других мест произрастания рассмотренных нами происхождений ели сибирской. Эти же оба происхождения относятся к группе наихудшего роста, как было показано нами ранее [21].

Уровень достаточности насыщения водой хвои ели в естественных условиях роста оценивали по показателю *реального водного дефицита*. Значения этого показателя варьировали в пределах от 5,9 % у ели из Кировской области (№ 28) до 22,5 % у ели из Свердловской области (№ 42).

Данные по скорости дегидратации хвои, выраженные в единицах стандартного откло-

нения, были также распределены по четырем группам в единицах стандартного отклонения (см. табл. 5, см. рисунок). У ели сибирской скорость потери воды в целом была выше, чем у ели европейской и гибридов двух видов ели (с преобладанием ели европейской и ели сибирской). Эти происхождения попали в группу I с наименьшим значением критериев t_{40} и t_{50} . Максимальное время 26 и 29 ч, до достижения критического уровня дегидратации 50 % было отмечено у происхождений из Архангельской области — соответственно Котласского (№ 22) и Холмогорского (№ 23) районов.

Таким образом, при анализе данных по водному обмену хвои двух видов ели и их гибридных форм, произрастающих в географических культурах Архангельской области, было установлено, что уровень изменчивости параметров водного обмена у потомств ели европейской и интрогрессивных гибридов с ее участием был ниже, чем у ели сибирской. У происхождений ели сибирской наблюдался несколько более высокий уровень водного дефицита и повышенной скорости водоотдачи. Ранее нами также было отмечено увеличение скорости водоотдачи у сосны и ели восточного происхождения, генотип которой сформировался в условиях резкоконтинентального климата [32]. В условиях Республики Коми было установлено, что при оптимальных условиях почвенного водоснабжения хвоя местной ели характеризуется довольно устойчивой обводненностью при более изменчивом показателе водного дефицита [15].

Проведенные нами ранее исследования по оценке экологической пластичности ели [21–23] на примере коллекций географических культур на Европейском севере России показали, что потомство локальных насаждений ели европейской (*Picea abies* L. Karst) и ее гибридных форм проявляет повышенную экологическую пластичность при выращивании в климатических условиях Севера за пределами ареала произрастания вида, несмотря на дальность перемещения. Установленная низкая экологическая пластичность ели сибирской, вероятно, может быть обусловлена особенностями водного обмена ее хвои — низкой водоудерживающей способностью и повышенным уровнем водного дефицита на фоне выровненного уровня обводненности хвои. Передача части аллелей ели европейской при интрогрессивной гибридизации с елью сибирской способствует изменению параметров водного режима и повышению устойчивости у ее гибридных форм, что может быть связано с исторической миграцией видов ели в пределах Восточно-Европейской равнины и комбинацией генов у отдельных видов.

Расселение ели в северном направлении Восточно-Европейской равнины шло в голоцене за счет миграции из сибирских и европейских рефугиумов. Ель *Picea abies* (L.) Karst перемещалась на север с юго-запада, ель *P. obovata* (Ledeb.) — перемещалась в сторону Восточно-Европейской равнины через Урал из Сибири [9]. Рефугиум, из которого в голоцене шло расселение ели, в том числе и на северо-восток Восточно-Европейской равнины, согласно генетическим исследованиям, представленным в работе [33], тяготеет к территории Беловежской Пущи. Современные молекулярные исследования доказывают наличие генетических различий между елью европейской и елью сибирской [34, 35]. У ели сибирской наблюдается низкое генетическое разнообразие в популяциях в отличие от ели европейской, что свидетельствует о ее большей уязвимости к изменениям климата в прошлом, чем ели европейской [35]. Все это и могло повлиять на снижение фенотипической пластичности ели сибирской и особенности ее водного режима, закрепленные наследственно.

Выводы

В коллекции географических культур Архангельской области выявлена невысокая изменчивость параметров водного обмена хвои у происхождений ели разных видов и исходных мест произрастаний, что позволяет оценить экологическую пластичность видов ели и их межвидовых гибридов. В испытываемой коллекции климатипов ели в большей степени проявляются видовые различия, необусловленные местоположением исходных популяций. У менее экологически пластичного вида ели сибирской *Picea obovata* (Ledeb.) наблюдались несколько повышенный уровень реального водного дефицита и увеличение скорости водоотдачи на фоне выровненного уровня содержания воды в хвое в благоприятных условиях для произрастания вида ели в средней подзоне тайги Архангельской области. Интрогрессивная гибридизация ели сибирской и европейской привела к изменению позиций, связанных с водным режимом, у их гибридных форм, закрепленных наследственно.

Экологически более пластичная ель европейская (*P. abies* (L.) Karst) при интрогрессивной гибридизации с елью сибирской внесла большой вклад в изменение водного режима популяции. Экологическая пластичность популяций, в том числе и особенность водного режима хвои, возможно, связана с эволюцией вида ели и историей ее послеледникового

расселения на территории Восточно-Европейской равнины. Подобные особенности водного режима видов ели и их гибридов, необходимо учитывать при рассмотрении вопросов, связанных с адаптацией вида к климатическим изменениям.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаврёва УрО РАН по теме «Исследование устойчивости лесных экосистем на приарктических территориях Европейского Севера России», № 125021902596-8.

Список литературы

- [1] Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2022. 124 с.
- [2] Seidel H., Menzel A. Above-ground dimensions and acclimation explain variation in drought mortality of Scots Pine seedlings from various provenances // *Frontiers in Plant Science*, 2016, v. 7, pp. 1014. DOI 10.3389/fpls.2016.01014
- [3] 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.
- [4] Huang J-G., Bergeron Y., Berninger F., Zhai L., Tardif J.C., Denneler B. Impact of future climate on radial growth of four major boreal tree species in the Eastern Canadian boreal forest // *PLoS ONE*, 2013, v. 8 (2), art. e56758. DOI 10.1371/journal.pone.0056758
- [5] Gömöry D., Ditmarová L., Hrivnák M., Jamnická G., Konôpková A., Krajmerová D., Kurjak D., Marešová J. Inconsistent phenotypic differentiation at physiological traits in Norway spruce (*Picea abies* Karst.) provenances under contrasting water regimes // *Central European Forestry J.*, 2023, v. 69, pp. 214–223. DOI 10.2478/forj-2023-0010
- [6] Tsuda Y., Chen J., Stocks M., Källman T., Sønstebo J.H., Parducci L., Semerikov V., Sperisen C., Politov D., Ronkainen T., Välijärvi M., Vendramin G.G., Tollefsrud M.M., Lascoux M. The extent and meaning of hybridization and introgression between Siberian spruce (*Picea obovata*) and Norway spruce (*Picea abies*): cryptic refugia as stepping stones to the west? // *Molecular Ecology*, 2016, v. 25, iss. 12, pp. 2773–2789. DOI 10.1111/mec.13654
- [7] Nota K., Klaminder J., Milesi P., Bindler R., Nobile A., van Steijn T., Bertilsson S., Svensson B., Hirota S.K., Matsuo A., Gunnarsson U., Seppä H., Välijärvi M.M., Wohlfarth B., Suyama Y., Parducci L. Norway spruce postglacial recolonization of Fennoscandia // *Nature Communications*, 2022, v. 13, art. 1333. DOI 10.1038/s41467-022-28976-4
- [8] Правдин Л.Ф. Ель европейская и ель сибирская в СССР. М.: Наука, 1975. 178 с.
- [9] Попов П.П. Ель европейская и сибирская. Новосибирск: Наука, 2005. 231 с.
- [10] Bottero A., Forrester D.I., Cailleret M., Kohnle U., Gessler A., Michel D., Bose A.K., Bauhus J., Bugmann H., Cuntz M., Gillerot L., Hanewinkel M., Lévesque M., Ryder J., Sainte-Marie J., Schwarz J., Yousefpour R., Zamora-Pereira J.-C., Rigling A. Growth resistance and resilience of mixed silver fir and Norway spruce forests in central Europe: Contrasting responses to mild and severe droughts // *Global Change Biology*, 2021, v. 27, pp. 4403–4419. DOI 10.1111/gcb.15737
- [11] Патлай И.Н. Селекционно-экологические основы семеноводства и выращивания высокопродуктивных культур сосны обыкновенной, дуба черешчатого и ясеня обыкновенного в равнинной части Украинской ССР: автореф. дис. ... д-ра. с.-х. наук. Киев, 1984. 45 с.
- [12] Котов М.М. Интеграция генетических систем и структура популяций сосны обыкновенной // *Лесоведение*, 1996. № 5. С. 19–26.
- [13] Бессчетнова Н.Н. Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.). Эффективность отбора плюсовых деревьев. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородской ГСХА, 2016. 464 с.
- [14] Новицкая Ю.Е. Особенности физиолого-биохимических процессов в хвое ели и побегах ели в условиях Севера. Л.: Наука, 1971. 116 с.
- [15] Сенькина С.Н. Дневная динамика водообмена хвои ели в старовозрастных ельниках // *Вестник Института биологии*, 2007. № 5. С. 13–15.
- [16] Алексеенко Л.Н. Водный режим луговых растений в связи с условиями среды. Ленинград: Изд-во ЛГУ, 1976. 200 с.
- [17] Крамер П.Д., Козловский Т.Т. Физиология древесных растений. М.: Лесная пром-сть, 1983. 464 с.
- [18] Судачкова Н.Е., Шейн И.В., Романова Л.И., Милюткина И.Л., Кудашова Ф.Н., Варахина Т.Н., Степень Р.А. Биохимические индикаторы стрессового состояния древесных растений. Новосибирск: Наука, 1997. 176 с.
- [19] Новицкая Ю.Е., Чикина П.Ф., Софронова Г.И., Габукова В.В., Макаревский М.Ф. Физиолого-биохимические основы роста и адаптации сосны на Севере. Л.: Наука, 1985. 156 с.
- [20] Liepe K.J., van der Maaten E., van der Maaten-Theunissen M., Liesebach M. High phenotypic plasticity, but low signals of local adaptation to climate in a large-scale transplant experiment of *Picea abies* (L.) Karst. in Europe // *Frontiers in Forests and Global Change*, 2022, v. 5, art. 804857. DOI 10.3389/ffgc.2022.804857
- [21] Nakvasina E.N., Volkov A.G., Prozherina N.A. Evaluation of survival and growth of *Picea abies* (L.) Karst. and *P. obovata* (Ledeb.) provenances in the North of Russia // *J. of Forest Science*, 2017, v. 63(9), pp. 401–407. DOI 10.1515/ffp-2017-0023
- [22] Nakvasina E., Demina N., Prozherina N., Demidova N. Assessment of phenotypic plasticity of spruce species *Picea abies* (L.) Karst. and *P. obovata* (Ledeb.) on provenances tests in European North of Russia // *Central European Forestry J.*, 2019, v. 65, pp. 121–128. DOI 10.2478/forj-2019-0012
- [23] Наквасина Е.Н., Прожерина Н.А. Оценка отклика на изменение климата в опытах с происхождениями *Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* (Ledeb.) на севере Русской равнины // *Известия вузов. Лесной журнал*, 2023. № 1. С. 22–37. DOI 10.18698/2542-1468-2023-4-36-46

- [24] Наквасина Е.Н. Юдина О.А., Прожерина Н.А., Камалова И.И., Минин Н.С. Географические культуры в ген-экологических исследованиях на европейском Севере. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2008. 310 с.
- [25] Курнаев С.Ф. Лесорастительное районирование. М.: Наука, 1973. 203 с.
- [26] Бобровская Н.И. О водном балансе древесных и кустарниковых видов песчаной пустыни Каракумы // Ботанический журнал, 1971. Т. 56. № 3. С. 361–368.
- [27] Баврина А.П., Борисов И.Б. Современные правила применения корреляционного анализа // Медицинский альманах, 2012. № 3(68). С. 70–79.
- [28] Мамаев С.А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений (на примере семейства Pinaceae на Урале). М.: Наука, 1971. 283 с.
- [29] Петров С.А. Исследование внутрипопуляционной изменчивости признаков древесных растений в связи с вопросами лесной селекции: автореф. дис. ... д-ра. биол. наук. Свердловск, 1975. 54 с.
- [30] Котов М.М., Лебедева Э.П., Прохорова Е.В. Вододерживающая способность хвои как диагностический признак для оценки объектов единого генетико-селекционного комплекса // ИзВУЗ Лесной журнал, 2002. № 4. С. 59–65.
- [31] Тихонова Н.А., Тихонова И.В. Вододерживающая способность хвои в популяциях основных лесообразующих видов хвойных в лесах таежной зоны Сибири // ИзВУЗ Лесной журнал, 2019. № 5. С. 83–94. DOI 10.17238/issn0536-1036.2019.5.83
- [32] Прожерина Н.А., Гвоздухина О.А., Наквасина Е.Н. Показатели водного обмена ели (*Picea abies*×*obovata* Ledeb) как критерии адаптации в изменяющихся условиях среды // ИзВУЗ Лесной журнал, 2006. № 6. С. 7–11.
- [33] Dering M., Lewandowski A. Postglacial re-colonization of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karsten) in Poland based on molecular markers // Proceedings of conference session abstracts «Norway Spruce in the Conservation of Forest Ecosystems in Europe». Organized by: IUFRO W.P. S 2.02.11. 2007. Warszawa–Malinówka–Białystok–Warszawa, September 3–5, 2007, p. 37.
- [34] Tollefsrud M.M., Kissling R., Gugerli F., Johnsen Ø., Skrøppa T., Cheddadi R., van der Knaap W.O., Latalowa M., Terhürne-Berson R. Litt T., Geburek T., Brochmann C., Sperisen C. Genetic consequences of glacial survival and postglacial colonization in Norway spruce: combined analysis of mitochondrial DNA and fossil pollen // Molecular Ecology, 2008, v. 17, iss. 18, pp. 4134–4150. DOI 10.1111/j.1365-294X.2008.03893.x
- [35] Tollefsrud M.M., Latalowa M., van der Knaap W.O., Brochmann C., Sperisen C. Late Quaternary history of North Eurasian Norway spruce (*Picea abies*) and Siberian spruce (*Picea obovata*) inferred from macrofossils, pollen and cytoplasmic DNA variation // J. of Biogeography, 2015, v. 42, iss. 8, pp. 1431–1442. DOI 10.1111/jbi.12484

Сведения об авторах

Прожерина Надежда Александровна [✉] — канд. биол. наук, ст. науч. сотр., ФГБУН «Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаврёрова Уральского отделения Российской академии наук» (ФИЦКИА УрО РАН), pronad1@yandex.ru

Наквасина Елена Николаевна — д-р с.-х. наук, профессор, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), e.nakvasina@narfu.ru

Поступила в редакцию 01.03.2024.

Одобрено после рецензирования 27.11.2024.

Принята к публикации 31.01.2025.

INTERSPECIFIC AND INTRASPECIFIC CHARACTER OF SPRUCE NEEDLES (*PICEA ABIES* (L.) KARST. × *P. OBOVATA* (LEDEB.)) WATER REGIME

N.A. Prozherina^{1✉}, E.N. Nakvasina²

¹N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the 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

pronad1@yandex.ru

The article studies water regime parameters of annotinous needles (water content in needles, level of real water deficit, water release rate of isolated needles) in 27 Siberian spruces (*Picea obovata* (Ledeb.), European spruce (*P. abies* (L.) Karst.) and their interspecific hybrids in the collection of geographical cultures within the Arkhangelsk region (62°54'N, 40°24'E). A low variability of parameters of water exchange in spruce needles of different species and initial growing sites was revealed. In the tested collection of spruce climatypes, species differences unrelated to the location of source populations are more evident. It is concluded that the ecological adaptation of Siberian spruce species is lower than that of European spruce and introgressive hybrids with its participation. In the less ecologically adaptive species of Siberian spruce *P. obovata* (Ledeb.), a slightly increased level of real water deficit and an increase in the rate of needle water retention in the origins against the background of a levelled water content in the needles were revealed. Introgressive hybridisation of Siberian spruce and European spruce resulted in a change of positions related to water regime in their hybrid forms fixed hereditarily. It is shown that the adaptive ability of spruce populations differing in geographical origin and the peculiarity of the water regime of its needles may be related to the evolution of the species and the history of postglacial dispersal on the territory of the East European Plain and the growth of two species in the zone of introgressive hybridisation — *P. abies* (L.) Karst. and *P. obovata* (Ledeb.) and their hybrid forms.

Keywords: Siberian spruce, European spruce, geographic crops, intraspecific and interspecific variability, water content, water deficit

Suggested citation: Prozherina N.A., Nakvasina E.N. *Mezhvidovye i vnutrividovye priznaki vodnogo rezhima khvoi eli (Picea abies (L.) Karst. × P. obovata (Ledeb.))* [Interspecific and intraspecific character of spruce needles (*Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* (Ledeb.)) water regime]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 2, pp. 5–17. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-2-5-17

Reference

- [1] *Tretiy otsenochnyy doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii. Obshchee rezюме* [Third Assessment Report on Climate Change and its Impacts on the Territory of the Russian Federation. General summary]. St. Petersburg: Naukoemkie tekhnologii, 2022, 124 p.
- [2] Seidel H., Menzel A. Above-ground dimensions and acclimation explain variation in drought mortality of Scots Pine seedlings from various provenances. *Frontiers in Plant Science*, 2016, v. 7, p. 1014. DOI 10.3389/fpls.2016.01014
- [3] 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.
- [4] Huang J-G., Bergeron Y., Berninger F., Zhai L., Tardif J.C., Denneler B. Impact of future climate on radial growth of four major boreal tree species in the Eastern Canadian boreal forest. *PLoS ONE*, 2013, v. 8 (2), art. e56758. DOI 10.1371/journal.pone.0056758
- [5] Gömöry D., Dítmarová L., Hrivnák M., Jamnická G., Konôpková A., Krajmerová D., Kurjak D., Marešová J. Inconsistent phenotypic differentiation at physiological traits in Norway spruce (*Picea abies* Karst.) provenances under contrasting water regimes. *Central European Forestry J.*, 2023, v.69, pp. 214–223. DOI 10.2478/forj-2023-0010
- [6] Tsuda Y., Chen J., Stocks M., Källman T., Sönstebø J.H., Parducci L., Semerikov V., Sperisen C., Politov D., Ronkainen T., Väiliranta M., Vendramin G.G., Tollefsrud M.M., Lascoux M. The extent and meaning of hybridization and introgression between Siberian spruce (*Picea obovata*) and Norway spruce (*Picea abies*): cryptic refugia as stepping stones to the west? *Molecular Ecology*, 2016, v. 25, iss. 12, pp. 2773–2789. DOI 10.1111/mec.13654
- [7] Nota K., Klaminder J., Milesi P., Bindler R., Nobile A., van Steijn T., Bertilsson S., Svensson B., Hirota S.K., Matsuo A., Gunnarsson U., Seppä H., Väiliranta M.M., Wohlfarth B., Suyama Y., Parducci L. Norway spruce postglacial recolonization of Fennoscandia. *Nature Communications*, 2022, v. 13, art. 1333 DOI 10.1038/s41467-022-28976-4
- [8] Pravdin L.F. *El' evropeyskaya i el' sibirskaya v SSSR* [European spruce and Siberian spruce in the USSR]. Moscow: Nauka, 1975, 178 p.
- [9] Popov P.P. *El' evropeyskaya i sibirskaya* [European and Siberian spruce]. Novosibirsk: Nauka, 2005, 231 p.
- [10] Bottero A., Forrester D.I., Cailleret M., Kohnle U., Gessler A., Michel D., Bose A.K., Bauhus J., Bugmann H., Cuntz M., Gillerot L., Hanewinkel M., Lévesque M., Ryder J., Sainte-Marie J., Schwarz J., Yousefpour R., Zamora-Pereira J.-C., Rigling A. Growth resistance and resilience of mixed silver fir and Norway spruce forests in central Europe: Contrasting responses to mild and severe droughts. *Global Change Biology*, 2021, v. 27, pp. 4403–4419. DOI 10.1111/gcb.15737

- [11] Patlai I.N. *Selektsionno-ekologicheskie osnovy semenovodstva i vyrashchivaniya vysokoproduktivnykh kul'tur sosny obyknovennoy, duba chereshchatogo i yasenya obyknovennogo v ravninnoy chasti Ukrainskoy SSR* [Selection and ecological bases of seed production and cultivation of high-yielding crops of common pine, petiole oak and common ash in the plain part of the Ukrainian SSR]. Avtoref. Dis. D-r Sci. (Agric.). Kiev, 1984, 45 p.
- [12] Kotov M.M. *Integratsiya geneticheskikh sistem i struktura populyatsiy sosny obyknovennoy* [Integration of genetic systems and the structure of populations of Scots pine]. *Lesovedenie* [Forestry], 1996, no. 5, pp. 19–26.
- [13] Besschetnova N.N. *Sosna obyknovennaya (Pinus sylvestris L.). Effektivnost' otbora plyusovykh derev'ev* [Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). Efficiency of selection of plus trees]. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, 2016, 464 p.
- [14] Novitskaya Yu.E. *Osobennosti fiziologo-biokhimicheskikh protsessov v khvoe eli i pobegakh eli v usloviyakh Severa* [Features of physiological and biochemical processes in spruce needles and shoots in the conditions of the North]. Leningrad: Nauka, 1971, 116 p.
- [15] Sen'kina S.N. *Dnevnyaya dinamika vodoobmena khvoi eli v starovozrastnykh el'nikakh* [Daytime dynamics of spruce needle water exchange in old-growth spruce forests]. *Vestnik Instituta biologii* [Bulletin of the Institute of Biology], 2007, no. 5, pp. 13–15.
- [16] Alekseenko L.N. *Vodnyy rezhim lugovykh rasteniy v svyazi s usloviyami sredy* [Water regime of meadow plants in connection with environmental conditions]. Leningrad: LSU, 1976, 200 p.
- [17] Kramer P.D., Kozlovskiy T.T. *Fiziologiya drevesnykh rasteniy* [Physiology of woody plants]. Moscow: Lesnaya promyshlennost, 1983, 464 p.
- [18] Sudachkova N.E., Shein I.V., Romanova L.I., Milyutina I.L., Kudashova F.N., Varaksina T.N., Stepen' R.A. *Biokhimicheskie indikatorы stressovogo sostoyaniya drevesnykh rasteniy* [Biochemical indicators of stress condition of woody plants]. Novosibirsk: Nauka, 1997, 176 p.
- [19] Novitskaya Y.E., Chikina P.F., Sofronova G.I., Gabukova V.V., Makarevsky M.F. *Fiziologo-biokhimicheskie osnovy rosta i adaptatsii sosny na Severe* [Physiological and biochemical bases of growth and adaptation of pine in the North]. Leningrad: Nauka, 1985, 156 p.
- [20] Liepe K.J., van der Maaten E., van der Maaten-Theunissen M., Liesebach M. High phenotypic plasticity, but low signals of local adaptation to climate in a large-scale transplant experiment of *Picea abies* (L.) Karst. in Europe. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2022, v. 5, art. 804857. DOI 10.3389/ffgc.2022.80485
- [21] Nakvasina E.N., Volkov A.G., Prozherina N.A. Evaluation of survival and growth of *Picea abies* (L.) Karst. and *P. obovata* (Ledeb.) provenances in the North of Russia. *J. of Forest Science*, 2017, v. 63(9), pp. 401–407. DOI 10.1515/ffp-2017-0023
- [22] Nakvasina E., Demina N., Prozherina N., Demidova N. Assessment of phenotypic plasticity of spruce species *Picea abies* (L.) Karst. and *P. obovata* (Ledeb.) on provenances tests in European North of Russia. *Central European Forestry Journal*, 2019, v. 65, pp. 121–128. DOI 10.2478/forj-2019-0012
- [23] Nakvasina E.N., Prozherina N.A. *Otsenka otklika na izmenenie klimata v opytakh s proiskhozhdeniyami Picea abies (L.) Karst. × P. obovata (Ledeb.) na severe Russkoy ravniny* [Assessment of the response to climate change in experiments with the origins of *Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* (Ledeb.) in the northern Russian Plain]. *Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2023, no. 1, pp. 22–37. DOI 10.18698/2542-1468-2023-4-36-46
- [24] Nakvasina E.N., Yudina O.A., Prozherina N.A., Kamalova I.I., Minin N.S. *Geograficheskie kul'tury v gen-ekologicheskikh issledovaniyakh na evropeyskom Severe* [Provenance test in gene-ecological research in the European North]. Arkhangelsk: AGTU, 2008, 310 p.
- [25] Kurnaev S.F. *Lesorastitel'noe rayonirovanie* [Forest zoning]. Moscow: Nauka, 1973, 203 p.
- [26] Bobrovskaya N.I. *O vodnom balanse drevesnykh i kustarnikovykh vidov peschanoy pustyni Karakumy* [On water balance of tree and shrub species of the Karakum sand desert]. *Botanicheskiy zhurnal* [Botanical Journal], 1971, t. 56, no. 3, pp. 361–368.
- [27] Bavrina A.P., Borisov I.B. *Sovremennyye pravila primeneniya korrelyatsionnogo analiza* [Modern rules of application of correlation analysis]. *Meditinskiy al'manakh* [Medical Almanac], 2012, no. 3(68), pp. 70–79.
- [28] Mamaev S.A. *Formy vnutrividovoy izmenchivosti drevesnykh rasteniy (na primere semeystva Pinacea na Urale)* [Forms of intraspecific variability of woody plants (on the example of the Pinacea family in the Urals)]. Moscow: Nauka, 1971, 283 p.
- [29] Petrov S.A. *Issledovanie vnutripopulyatsionnoy izmenchivosti priznakov drevesnykh rasteniy v svyazi s voprosami lesnoy selektsii* [Study of intrapopulation variability of woody plant traits in connection with the issues of forest selection]. Dis. D-r Sci. (Biol.). Sverdlovsk, 1975, 54 p.
- [30] Kotov M.M., Lebedeva E.P., Prokhorova E.V. *Vodouderzhivayushchaya sposobnost' khvoi kak diagnosticheskiy priznak dlya otsenki ob'ektov edinogo genetiko-selektsionnogo kompleksa* [Water-holding capacity of needles as a diagnostic trait for evaluating the objects of a single genetic and breeding complex]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2002, no. 4, pp. 59–65.
- [31] Tikhonova N.A., Tikhonova I.V. *Vodouderzhivayushchaya sposobnost' khvoi v populyatsiyakh osnovnykh lesoobrazuyushchikh vidov khvoynykh v lesakh taezhnoy zony Sibiri* [Water-holding capacity of needles in populations of the main forest-forming conifer species in the forests of the taiga zone of Siberia]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2019, no. 5, pp. 83–94. DOI 10.17238/issn0536-1036.2019.5.83
- [32] Prozherina N.A., Gvozdukhina O.A., Nakvasina E.N. *Pokazateli vodnogo obmena eli (Picea abies × obovata Ledeb) kak kriterii adaptatsii v izmenyayushchikhsya usloviyakh sredy* [Indicators of water metabolism of spruce (*Picea abies* × *obovata* Ledeb) as criteria of adaptation in changing environmental conditions]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2006, no. 6, pp. 7–11.

- [33] Dering M., Lewandowski A. Postglacial re-colonization of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karsten) in Poland based on molecular markers. Proceedings of conference session abstracts «Norway Spruce in the Conservation of Forest Ecosystems in Europe». Organized by: IUFRO W.P. S 2.02.11. 2007. Warszawa–Malinówka–Białystok–Warszawa, September 3–5, 2007, p. 37.
- [34] Tollefsrud M.M., Kissling R., Gugerli F., Johnsen Ø., Skrøppa T., Cheddadi R., van der Knaap W.O., Latałowa M., Terhürne-Berson R. Litt T., Geburek T., Brochmann C., Sperisen C. Genetic consequences of glacial survival and post-glacial colonization in Norway spruce: combined analysis of mitochondrial DNA and fossil pollen. *Molecular Ecology*, 2008, v. 17, iss. 18, pp. 4134–4150. DOI 10.1111/j.1365-294X.2008.03893.x
- [35] Tollefsrud M.M., Latałowa M., van der Knaap W.O., Brochmann C., Sperisen C. Late Quaternary history of North Eurasian Norway spruce (*Picea abies*) and Siberian spruce (*Picea obovata*) inferred from macrofossils, pollen and cytoplasmic DNA variation. *J. of Biogeography*, 2015, v. 42, iss. 8, pp. 1431–1442. DOI 10.1111/jbi.12484

The research was carried out within the framework of the state assignment of the Federal Research Centre for Integrated Arctic Studies named after Academician N.P. Lavyorov of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences on the theme «Study of the sustainability of forest ecosystems in the subarctic territories of the European North of Russia», № 125021902596-8.

Authors' information

Prozherina Nadezhda Aleksandrovna  — Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher of the Federal Center for Integrated Arctic Research named after N.P. Laverov, pronad1@yandex.ru

Nakvasina Elena Nikolaevna — Dr. Sci. (Agriculture), Professor of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, e.nakvasina@narfu.ru

Received 01.03.2024.

Approved after review 27.11.2024.

Accepted for publication 31.01.2025.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

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

The authors declare that there is no conflict of interest

ЛЕСОВОДСТВЕННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВАЛОЧНО-ПАКЕТИРУЮЩЕЙ МАШИНЫ ЛП-19 ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЧЕРЕСПЛОСНЫХ ПОСТЕПЕННЫХ РУБОК В ПРОИЗВОДНЫХ БЕРЕЗНЯКАХ

Л.А. Белов¹✉, К.А. Башегуров¹, И.В. Безденежных¹,
С.В. Залесов¹, Н.М. Итешина²

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

²ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный аграрный университет» (УдГАУ), Россия, 426069,
Удмуртская Республика, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 11

belovla@m.usfeu.ru

Проанализированы последствия проведения чересполосных постепенных рубок в спелых и перестойных производных березняках с использованием валочно-пакетирующей машины ЛП-19. Установлено, что оставленные на доразивание после первого приема двухприемной чересполосной постепенной рубки полосы березового древостоя шириной 10...15 м не повреждаются ветром, а за счет бокового освещения в них формируется второй ярус из подроста ели и пихты. Показано, что по причине высокой доли волоков и уничтожения в процессе первого приема чересполосной постепенной рубки хвойного подроста предварительной генерации на вырубленных полосах формируются лиственные молодняки. Рекомендуется при проведении чересполосной постепенной рубки отдавать предпочтение традиционным технологиям проведения лесосечных работ, а при использовании валочно-пакетирующей машины ЛП-19 рубки проводить в зимний период с целью минимизации негативного воздействия на почву и максимального сохранения хвойного подроста. Соблюдение указанных рекомендаций позволит перестроивать спелые и перестойные производные березовые насаждения в коренные хвойные, не прибегая к искусственному лесовосстановлению.

Ключевые слова: чересполосные постепенные рубки, производные березняки, подрост, второй ярус, перестроивание древостоев

Ссылка для цитирования: Белов Л.А., Башегуров К.А., Безденежных И.В., Залесов С.В., Итешина Н.М. Лесоводственная эффективность использования валочно-пакетирующей машины ЛП-19 при проведении чересполосных постепенных рубок в производных березняках // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 2. С. 18–29. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-2-18-29

Доминирование в практике лесопользования сплошных преимущественно концентрированных рубок спелых и перестойных насаждений в XX в. обусловило массовую смену высокопроизводительных хвойных насаждений на производные мягколиственные [1–4]. В 1948 г. площадь еловых насаждений в Пермском крае составляла 6431,4 тыс. га (69,5 % общей покрытой лесной растительностью площади). В 2018 г. эта площадь не превышала 5246,7 тыс. га (47,27 % общей площади) [5]. При этом за аналогичный период площадь березняков увеличилась с 1489,9 тыс. га (16,1 %) до 3483,1 тыс. га (31,38 %), площадь осинников — с 194,33 тыс. га (2,1 %) до 605,0 тыс. га (5,45 %), липняков — с 46,3 тыс. га (0,5 %) до 279,2 тыс. га (2,52 %). Другими словами, пло-

щадь ельников за 70 лет уменьшилась на 18,4 %, а площадь лиственных насаждений, напротив, увеличилась: березняков — на 133,8 %, осинников — на 211,3 %, липняков — на 503,0 %.

Приведенный пример наглядно свидетельствует о сокращении площади коренных хвойных насаждений на производные мягколиственные, а соответственно запасов хвойной древесины в будущем. Если учесть, что в настоящее время и в обозримом будущем спрос на хвойную древесину выше, чем на лиственную, то становится понятной нежелательность указанной смены пород. Кроме того, абсолютное большинство крупных лесоперерабатывающих предприятий Пермского края в качестве сырья для производства конечной продукции используют хвойную древесину, в частности хвойные балансы и пиловочник. Следовательно, смена ельников на березняки

и осинники приведет к истощению сырьевых баз и вызовет необходимость их перепрофилирования, что не только проблематично, но и связано с огромными трудовыми и финансовыми затратами.

В то же время мнение большинства ученых едино в том, что производные лиственные насаждения в меньшей степени, чем хвойные, выполняют защитные функции, имеют ограниченное биологическое разнообразие и обеспечивают выращивание менее ценной древесины, что обуславливает необходимость переформирования их в хвойные. К сожалению, на практике это не происходит, вероятно, в связи с сплошнолесосечными рубками производных мягколиственных древостоев при достижении ими возраста спелости. При этом на вырубках формируются преимущественно длительно-производные мягколиственные молодняки с высокой долей или даже преобладанием в составе осины. Последнее объясняется тем, что береза вегетативно размножается порослью от пня и ее подрост приурочен к пням спиленных деревьев, а осина дает многочисленные корневые отпрыски, количество которых достигает 150 тыс. шт./га. При этом подрост темнохвойных пород предварительной генерации, даже если он и имел место под пологом производных березовых насаждений, в большинстве своем погибает вследствие резкого изменения микроклиматических условий на вырубке.

Проблема увеличения доли хвойных насаждений может быть решена заменой сплошнолесосечных рубок на выборочные с формированием хвойных молодняков из подроста предварительной и сопутствующей генераций [6–11]. Однако несмотря на тот факт, что сплошнолесосечные рубки в защитных лесах запрещены, выборочные рубки во многих субъектах Российской Федерации крайне ограничены или даже не включены в лесохозяйственные регламенты лесничеств, что исключает возможность их применения [12–15].

Это объясняется боязнью нарушения лесоводственных требований к проведению выборочных рубок по причине низкой квалификации исполнителей и отсутствием региональных исследований лесоводственной эффективности различных видов выборочных рубок.

Сложившаяся практика лесопользования приводит к тому, что спелые и перестойные насаждения в защитных лесах, которые составляют в Российской Федерации около 25 % площади лесного фонда, в активную эксплуатацию не вовлекаются. Другими словами, государство не получает ожидаемого дохода при

сохранении значительных затрат на их охрану и защиту. Кроме того, отсутствие рубок спелых и перестойных насаждений в защитных лесах приводит к их старению, ухудшению санитарного состояния, накоплению напочвенных горючих материалов и сухостоя, что, в конечном счете, резко увеличивает потенциальную пожарную опасность и усложняет ликвидацию лесных пожаров в случае их возникновения. Кроме того, защитные леса при отсутствии мероприятий по их омоложению утрачивают или значительно снижают защитные функции, что не может не сказываться на экологической обстановке как в конкретных субъектах Российской Федерации, так и страны в целом.

В эксплуатационных лесах, как было отмечено ранее, отказ от выборочных рубок и продолжение использования сплошнолесосечных рубок приводит к нежелательной смене пород. Кроме того, в процессе сплошнолесосечных рубок, как правило, уничтожаются тонкомерные деревья хвойных пород из второго яруса и крупный подрост, которые характеризуются высоким приростом. В то же время действующими нормативно-правовыми документами допускается проведение, в зависимости от таксационных показателей древостоев, семь видов выборочных рубок.

Одним из наиболее привлекательных и простых в исполнении видом выборочных рубок спелых и перестойных насаждений являются чересполосные постепенные рубки. Они сочетают в себе преимущества сплошнолесосечных и выборочных рубок. В зависимости от почвенных условий и таксационных показателей насаждений указанные рубки проводятся в 2–4 приема и не требуют отбора конкретных деревьев в рубку, поскольку рубка осуществляется полосами определенной ширины.

Официально чересполосные постепенные (полосно-постепенные) рубки были включены в практику лесопользования во второй половине XX в. Однако в ленточных борах Алтайского края они проводились еще в начале XX в. и показали высокую лесоводственную эффективность [16–18]. Позднее чересполосные постепенные рубки были апробированы во многих регионах страны в насаждениях различных типов леса и лесных формаций [19–28]. Помимо анализа чересполосных постепенных рубок и их влияния на древостой проанализировано влияние этих рубок на динамику живого напочвенного покрова [29], распределение осадков, промерзание почвы и накопление хвойного подроста сопутствующей генерации [30, 31].

Экспериментально установлено, что не всегда чересполосные постепенные рубки обеспечивают желаемый результат. Так, на мелких переувлажненных почвах нередко наблюдается ветровал, являющийся следствием проведения чересполосных постепенных рубок в перестойных еловых и пихтовых насаждениях, пораженных комлевыми гнилями. Правила санитарной безопасности в лесах [32] запрещают проведение чересполосных постепенных рубок в еловых и пихтовых лесных насаждениях.

Опасность ветровала в оставляемых после проведения первого приема чересполосной постепенной рубки полосах обосновывается отсутствием региональных научно-обоснованных данных об устойчивости насаждений различных типов леса и лесных формаций. Кроме того, вызывает опасение вероятность накопления самосева в вырубаемых полосах и последующее накопление подроста хвойных пород, способного заменить материнский древостой, не прибегая к искусственному лесовосстановлению. Последнее особенно актуально если учесть, что первоочередными объектами чересполосных постепенных рубок являются спелые и перестойные производные березовые насаждения с незначительной долей в составе древостоев ели.

Высокое потенциальное плодородие почвы в производных березовых насаждениях разнотравной, кисличной и липняковой групп типов леса обеспечивает после вырубki древостоя разрастание травянистой и кустарниковой растительности, что исключает накопление самосева хвойных пород при сплошнолесосечных рубках. Опасность задернения вырубаемых полос существует и при чересполосных постепенных рубках. Указанное сформировало в ряде субъектов Российской Федерации устойчивое мнение, что формирование ельников, после вырубki производных березовых насаждений, возможно только при условии создания лесных культур с последующими неоднократными агротехническими и лесоводственными уходами. Возможность переформирования производных березняков в ельнике выборочными рубками, в том числе чересполосными постепенными, при этом вызывает сомнение, поскольку при их проведении создание лесных культур не предусматривается.

Лесоводственная эффективность выборочных рубок, в том числе и чересполосных постепенных рубок, во многом зависит от технологии проведения лесосечных работ и применяемой лесозаготовительной техники. При этом особый интерес представляют данные о возможности применения агрегатной техники при выборочных рубках.

Цель работы

Цель работы — установление лесоводственной эффективности двухприемных чересполосных постепенных рубок в производных березняках южнотаежного лесного района европейской части Российской Федерации в границах Удмуртской Республики с использованием валочных машин ЛП-19.

Объект и методика исследований

Объектом исследований служили производные березовые насаждения, пройденные первым приемом двухприемной чересполосной постепенной рубки (ЧПР). До ее проведения в Севинском участковом лесничестве Глазовского лесничества Удмуртской Республики, где выполнены исследования, согласно материалам лесоустройства 1996 г., произрастали производные березовые древостой с примесью осины, которые сформировались на вырубках после проведения сплошнолесосечных рубок. Работы проводились в кварталах 17 (выдел 7) и 18 (выдел 7) в кисличном типе леса (класс бонитета II) при относительной полноте 0,5 и запасе древесины 130 м³/га (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Таксационная характеристика средневозрастных (65 лет) насаждений средней высотой 21 м до проведения двухприемных чересполосных постепенных рубок, по материалам лесоустройства 1996 г., в Севинском участковом лесничестве

Taxation characteristics of middle-aged (65 years old) stands with an average height of 21 m before two-stage alternate strip felling, based on the 1996 forest inventory materials, in the Sevin forest range

Показатель	Квартал	
	17	18
Состав древостоя	7Б3Ос+Е	9Б1Ос+Е
Средний диаметр ствола, см	20	18

Представленные в табл. 1 материалы наглядно демонстрируют, что сплошнолесосечные рубки в высокотрофных коренных еловых насаждениях Республики Удмуртия приводят к смене пород. На месте ельников формируются березняки с примесью осины до 30 % от запаса. Это позволяет предположить, что при прове-

дении сплошнолесосечных рубок в указанных мягколиственных насаждениях на вырубках будут формироваться длительно-производные осиново-березовые молодняки. В то же время сравнительно невысокие значения относительной полноты древостоя и наличие в его составе примеси ели объясняют формирование подроста ели предварительной генерации в количестве 3,0 тыс. шт./га при его средней высоте, по данным лесоустройства, 3,0 м.

Территория района исследований, согласно действующему нормативному документу [33], относится к южнотаежному лесному району европейской части РФ.

В квартале 18 Севинского участкового лесничества в 1996 г. был проведен первый прием ЧПР с шириной вырубаемых и оставляемых полос 10 м с использованием на валке деревьев

машины ЛП-19, а на трелевке древесины — трелевочного трактора.

В квартале 17 первый прием рубок был выполнен в 2002 г. с использованием аналогичной лесозаготовительной техники с шириной вырубаемых и оставляемых полос 15 м. Ширина вырубаемых полос в одном и другом случае объясняется ограниченным вылетом стрелы манипулятора ЛП-19. В процессе исследований применялся метод пробных площадей (ПП). Пробные площади закладывались в сентябре 2023 г. в вырубленных и невырубленных полосах в соответствии с требованиями ОСТ [34] и методических рекомендаций [35, 36]. Помимо таксационных показателей древостоев на всех ПП были установлены количественные и качественные показатели подроста путем закладки 30 учетных площадок размером 2×2 м.

Т а б л и ц а 2

Основные таксационные показатели насаждений после проведения первого приема чересполосных постепенных рубок с использованием валочно-пакетирующей машины ЛП-19

Main taxation parameters of the stands after the first stage of alternate strip felling with the use of feller-buncher LP-19

Номер пробной площади	Квартал	Выдел	Ярус	Состав	Порода	Средние		Класс бонитета	Тип леса	Сумма площадей сечений, м ² /га	Относительная полнота	Густота, шт./га	Запас древесины, м ³ /га	
						Средний возраст, лет	средний диаметр, см						средняя высота, м	общий
18-7-1	18	7	1	8Ив2ЛпедЕ	Ива	25	13,8	8,4	II	4,690	0,31	313	15	4
					Липа	25	13,4	8,8		0,526		38	3	0
					Ель	20	8,0	4,5	IV	0,063		13	0	0
					Итого					5,279		363	18	4
18-7-2	18	7	1	7Б3Ос	Береза	85	21,8	23,0	II	14,094	0,64	379	147	11
					Осина	85	41,4	29,5	Ia	5,775		43	76	0
					Итого					19,869		422	223	11
			2	9Е1ПедЛп	Ель	45	11,9	11,5	III	9,267	0,33	829	64	2
					Пихта	45	12,4	10,3	IV	0,686		57	4	0
					Липа		7,9	8,4		0,177		36	1	0
Итого					10,130	922	69	2						
17-7-1	17	7	1	7Ив2Ос1ЛпедБ	Ива	20	11,7	10,2	I	3,623	0,26	338	15	1
					Осина	20	8,4	13,1	Ia	0,550		100	4	1
					Липа	20	7,4	7,5		0,746		175	2	0
					Береза	20	4,0	4,5	IV	0,031		25	0	0
					Итого					4,949		638	21	2
17-7-2	17	7	1	5Б2Ос3ЕедЛп	Береза	90	23,0	22,9	II	14,398	0,65	313	151	24
					Осина	90	60,3	30,1	Ia	3,806		13	53	0
					Ель	80	35,2	21,3	II	7,789		80	99	0
					Липа	70	26,0	18,0		0,354		7	2	0

Примечание. Етр — ельник травяной; Екс — ельник кисличный.



Рис. 1. Внешний вид молодняков, формирующихся в полосах первого приема двухприемной чересполосной постепенной рубки, выполненных с использованием машины ЛП-19 (ПП-17-7-1)

Fig. 1. Young trees formed in the strips of the first reception of two-stage alternate strip felling, made with the use of machine LP-19 (PP-17-7-1)



Рис. 2. Трелевочный волок спустя 21 год после проведения первого приема чересполосной постепенной рубки (ПП-18-7-1)

Fig. 2. Skidder track 21 years after the first alternate strip felling (PP-18-7-1)

При перечете подроста на учетных площадках у каждого экземпляра определялся вид и жизненное состояние (жизнеспособный, сомнительный, нежизнеспособный) по состоянию ассимиляционного аппарата, приросту центрального побега и другим признакам; высота с подразделением на три группы: мелкий, средний и крупный, с учетом требований действующих нормативных документов [36, 37]. Кроме того, по наличию жизнеспособных экземпляров подроста каждого вида устанавливалась встречаемость как выраженное в процентах частное от деления количества учетных площадок с наличием хотя бы одного экземпляра

жизнеспособного подроста к общему количеству заложённых на пробной площади учетных площадок.

В целях оценки обеспеченности подростом хвойных пород, как вырубленных, так и оставленных на доращивание в процессе проведения чересполосных постепенных рубок полос, весь подрост пересчитывался в крупный с использованием коэффициента 0,5 для мелких по высоте экземпляров, 0,8 — для средних и 1,0 — для крупных.

Результаты и обсуждение

В процессе исследований установлены основные таксационные показатели насаждений после проведения первого приема ЧПР (табл. 2).

Из табл. 2 следует, что применение машины ЛП-19 при проведении ЧПР не позволяет обеспечить ожидаемого лесоводственного эффекта. Так, спустя 27 лет после рубки в вырубленных полосах шириной 10 м сформировалось мягколиственное насаждение с доминированием ивы в составе древостоя с относительной полнотой 0,31 (ПП-18-7-1) (рис. 1). Ель представлена в единичных экземплярах. Близкая к указанной картина наблюдается и на ПП-17-7-1 после проведения первого приема ЧПР 21 год тому назад. В составе древостоя доминирует ива, сильно поврежденная лосями (рис. 2). Другими словами, при ширине вырубленных полос 10...15 м и использовании на лесозаготовках машины ЛП-19 состав древостоев ухудшается. Причина заключается в высокой доле площади трелевочных волоков, сильном уплотнении почвы при проходе агрегатной техники и уничтожении в процессе проведения лесосечных работ подроста предварительной генерации. В результате вырубленные в первый прием ЧПР полосы зарастают травянистой растительностью и мягколиственными породами.

Таксационные показатели древостоев, оставленных на завершающий прием рубки свидетельствуют о том, что производные березовые насаждения характеризуются высокой устойчивостью к ветру. Даже при ширине оставляемых полос 10...15 м факторы бурелома и ветровала спустя 21...27 лет после проведения первого приема ЧПР не были зафиксированы, что позволяет рекомендовать двухприемные ЧПР к широкому применению в производных березовых насаждениях.

Специфической особенностью последствий проведения первого приема ЧПР является формирование в оставляемых на доращивание по-

лосах сложных двухъярусных насаждений с первым ярусом из березы и осины и вторым ярусом из ели и пихты (рис. 3). При этом спустя 21...27 лет после первого приема ЧПР сформировавшийся из подроста предварительной генерации второй ярус имеет относительную полноту 0,33 с запасом древесины 69...81 м³/га. При проведении завершающего приема рубки следует обеспечить максимальное сохранение деревьев второго яруса, что обеспечит сохранение покрытой лесом площади. Кроме того, молодые деревья ели и пихты второго яруса после снятия конкуренции верхнего яруса начинают обильное семеношение, а следовательно, увеличивают долю ели в составе формирующихся древостоев.

Соблюдение требования максимального сохранения деревьев ели из второго яруса позволяет предложить освоение указанных древостоев с двух трелевочных волоков, проложенных на участках, пройденных первым приемом ЧПР.



Рис. 3. Сложное насаждение в полосах второго приема чересполосной постепенной рубки при ширине лесосеки 10 м (ПП-18-7-2)

Fig. 3. Multi-storey stand in the strips of the second-stage alternate strip felling with a 10 m harvest area width (PP-18-7-2)

Т а б л и ц а 3

Характеристика подроста в полосах двухприемной чересполосной постепенной рубки в пересчете на крупный

Characteristics of the undergrowth in the areas of the second-stage alternate strip felling in terms of coarse wood

Номер пробной площади	Квартал	Выдел	Состав подроста	Порода	Количество подроста по жизнеспособности			Встречаемость, %	Количество жизнеспособного, шт./га
					жизнеспособный	среднежизнеспособный	нежизнеспособный		
18-7-1	18	7	7Б2Лп1Ос	Береза	1525	0	0	60	1525
				Липа	450	0	0	20	450
				Осина	325	0	0	20	325
				Итого	2300	0	0	–	2300
18-7-2	18	7	7Лп3ОседЕ	Липа	1600	0	80	16	1600
				Осина	750	0	0	20	750
				Ель	0	80	100	12	40
				Итого	2350	80	180	–	2390
					жизнеспособный	среднежизнеспособный	нежизнеспособный		
17-7-1	17	7	4Е4Б2Лп	Ель	809	0	0	24	809
				Береза	882	0	0	12	882
				Липа	456	0	0	18	456
				Итого	2147	0	0	–	2147
17-7-2	17	7	10ЛпедП	Липа	1231	0	0	38	1231
				Пихта	48	0	48	8	48
				Ель	0	0	625	27	0
				Итого	1279	0	673	–	1279

Поскольку характеристика древостоев в указанных полосах по таксационным показателям существенно уступает таковой в полосах второго приема рубки, ущерб от проведения лесосечных работ минимизируется, а лесоводственный эффект от сохранения второго хвойного яруса станет максимальным.

Анализируя лесоводственную эффективность двухприемных ЧПР, следует отметить, что подрост хвойных пород сопутствующей генерации практически не формируется (табл. 3).

Из табл. 3 следует, что при ширине полос ЧПР 10 м жизнеспособный подрост ели практически отсутствует как в вырубленных 27 лет тому назад полосах, так и в оставленных на доращивание. При ширине лесосек 15 м подрост ели имеет место в вырубленных 21 год тому назад полосах, однако его количество не превышает 0,8 тыс. шт./га в пересчете на крупный, а в оставленных полосах хвойных подрост представлен единичными экземплярами пихты и нежизнеспособными экземплярами ели.

Причины отсутствия хвойного подроста в вырубленных и оставленных на доращивание полосах различаются. В вырубленных полосах при уничтожении в процессе проведения лесосечных работ подрост предварительной генерации подрост сопутствующей генерации не формируется вследствие сильной конкуренции со стороны живого напочвенного покрова и мягколиственных пород. Кроме того, появлению подроста на трелевочных волоках препятствует уплотнение почвы.

В оставленных на доращивание полосах древостоя крупный подрост хвойных пород формирует второй ярус. Несмотря на боковое освещение высокая сомкнутость крон двухъярусного насаждения приводит к отмиранию мелкого подрост ели. В результате подрост представлен почти исключительно порослевой липой. Это убедительно свидетельствует о необходимости максимального сохранения хвойного подроста предварительной генерации в процессе проведения ЧПР.

В целях минимизации негативного влияния трелевки древесины на физические свойства почвы трелевочные волока рекомендуется укреплять порубочными остатками. Кроме того, планировать проведение ЧПР желательно на зимний период при промерзшем грунте и наличии снежного покрова, что позволит не только минимизировать негативное воздействие лесозаготовительной техники на почву, но и обеспечит максимальное сохранение хвойного подроста предварительной генерации. При отсутствии под пологом производных спелых и перестойных березовых

насаждений подрост хвойных пород на момент проведения ЧПР, сразу после проведения ее первого приема в вырубленных полосах необходимо провести минерализацию почвы как меру содействия сопутствующему лесовозобновлению. Кроме того, в вырубленных полосах, с целью минимизации опасности заглушения хвойного подрост мягколиственными породами в формирующихся молодняках необходимо проведение лесоводственных уходов за составом. Период проведения ЧПР следует сократить до 10 лет, что исключит повреждение оставляемых деревьев березы морозом и облегчит сохранение подрост темных хвойных пород.

При проведении ЧПР в производных березняках района исследований предпочтение следует отдавать традиционной технологии лесосечных работ в целях снижения доли трелевочных волоков и максимального сохранения крупного подрост и молодняка ели и пихты. Выполнение требования сохранения 70 % подрост предварительной генерации на пасаках [37] позволит не только обеспечить успешное лесовосстановление после завершающего приема ЧПР, но и сократит оборот рубки в будущих ельниках.

Выводы

1. При соблюдении лесоводственных требований по сохранению подрост и площади трелевочных волоков ЧПР могут стать эффективным лесоводственным мероприятием по переформированию производных березовых насаждений в коренные хвойные.

2. Использование при выполнении ЧПР агрегатных машин типа ЛП-19 нежелательно по причине сильного уплотнения почвы и высокой доли площади трелевочных волоков.

3. Минимизировать негативное возобновление лесосечных работ на почву можно установлением способа очистки мест рубок сбором порубочных остатков на трелевочные волока с целью их укрепления.

4. При проведении второго (завершающего) приема ЧПР следует использовать волока, проложенные по ранее вырубленным полосам в целях максимального сохранения хвойных деревьев второго яруса.

5. Учитывая, что средняя высота второго яруса составляет 11,5...14,0 м, для повышения его устойчивости к ветру следует оставить часть тонкомерных деревьев березы с таким расчетом, чтобы относительная полнота была не менее 0,45.

Список литературы

- [1] Залесов С.В. Лесоводство. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2020. 295 с.
- [2] Казанцев С.Г., Залесов С.В., Залесов А.С. Оптимизация лесопользования в производных березняках Среднего Урала. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2006. 156 с.
- [3] Калачев А.А. Пихтовые леса юго-западного Алтая и их рациональное использование. Алматы: Арыс, 2020. 212 с.
- [4] Цветков В.Ф. Камо грядеши. Некоторые вопросы лесоведения и лесоводства на Европейском Севере. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2000. 254 с.
- [5] Беляев Т.А., Нагимов З.Я., Шевелина И.В., Шерстнев В.А. Ретроспективный анализ изменения площади насаждений различных пород в лесном фонде Пермского края // Леса России и хозяйство в них, 2019. № 4 (71). С. 10–17.
- [6] Оплетаев А.С., Залесов С.В. Переформирование производных мягколиственных насаждений в лиственничники на Южном Урале. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2014. 178 с.
- [7] Теринов Н.Н., Герц Э.Ф., Мехренцев А.В. Применение природосберегающих технологий на проходных рубках в Уральском учебном опытном лесхозе УГЛТУ // ИзВУЗ Лесной журнал, 2018. № 4 (364). С. 87–96.
- [8] Абрамова Л.П., Залесов С.В., Казанцев С.Г., Луганский Н.А., Магасумова А.Г. Рубки обновления и переформирования в лесах Урала. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2007. 264 с.
- [9] Аглиуллин Ф.В. Постепенные рубки. Йошкар-Ола: Изд-во МарПИ, 1989. 60 с.
- [10] Белов Л.А., Залесова Е.С., Залесов С.В., Карташова Т.Ю., Тимербулатов Ф.Т. Опыт переформирования производных мягколиственных насаждений в коренные кедровники // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова, 2019. № 3 (56). С. 87–91.
- [11] Чмыр А.Ф. Структура и экология вторичных лиственных лесов на вырубках и их реконструкция. СПб.: Изд-во СПбНИИЛХ, 2002. 234 с.
- [12] Залесов С.В. Парадоксы нормативных документов по вопросам ведения лесного хозяйства и лесопользования // Актуальные проблемы лесного комплекса, 2018. Вып. 53. С. 18–21.
- [13] Залесова Е.С., Залесов С.В., Оплетаев А.С. Проблемы ведения лесного хозяйства в лесах различного целевого назначения // Экобиотек. 2020. Т. 3. С. 614–620.
DOI: 10.31163/2618-964x-2020-3-4-614-620
- [14] Zalesov S., Magasumova A. Protective forest management problems in Russia // E 35 Web of Conferences Ural Environmental Science Forum Sustainable Development of Industrial Region UESF 258, 08004 (2021). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125808004>
- [15] Залесов С.В., Сурнин П.Н., Бунькова Н.П., Осипенко А.Е., Панин И.А., Петров А.И. Интенсификация лесопользования путем совершенствования нормативно-правовых документов // Международный научно-исследовательский журнал, 2022. № 10 (124). С. 1–4.
DOI: <https://doi.org/10.23670/JRJ.2022.124.17>
- [16] Усов М.В., Залесов С.В., Шубин Д.А., Толстикова А.Ю., Белов Л.А. Перспективность применения чересполосных постепенных рубок в сосняках Алтая // Аграрный вестник Урала, 2017. № 1(155). С. 50–54.
- [17] Усов М.В. Лесоводственная эффективность чересполосных постепенных рубок в ленточных борах Алтайского края: дис. ... канд. с.-х. наук: 06.03.02. Екатеринбург, 2020. 197 с.
- [18] Залесов С.В., Осипенко А.Е., Толстикова А.Ю., Усов М.В., Гоф А.А., Савин В.В. Восстановление и омоложение ленточных боров Алтайского края. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2023. 360 с.
- [19] Данчева А.В., Залесов С.В. Влияние рубок ухода на биологическую устойчивость сосняков защитного назначения Северного Казахстана // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 4. С. 5–13. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-4-5-13
- [20] Временные указания по проведению полосно-постепенных рубок в лесах первой группы. М.: Госкомлес, 1986. 4 с.
- [21] Руководство по технологии и организации лесосечных работ при полосно-постепенных рубках в лесах первой группы Урала / сост. В.А. Помазник, Е.Г. Поздеев, И.Е. Кайний. Свердловск, 1987. 20 с.
- [22] Помазник В.А., Поздеев Е.Г. Организация опытных полосно-постепенных рубок // Лесная промышленность, 1987. № 11. С. 14–15.
- [23] Помазник В.А., Поздеев Е.Г. Полосно-постепенные рубки в лесах первой группы Урала // Лесоводство, лесоразведение, лесные пользования, 1990. Вып. 3. С. 1–24.
- [24] Федорчук В.Н., Кузнецова М.Л. Что такое полосно-постепенные рубки? // Лесное хозяйство, 1993. № 6. С. 26–28.
- [25] Помазник В.А., Залесов А.С., Магасумова А.Г. Влияние полосно-постепенных рубок на лесовозобновление в производных березняках Новолялинского лесхоза // Хвойные бореальной зоны, 2012. № 3–4. С. 303–306.
- [26] Годовалов Г.А., Чермных А.И., Усов М.В., Лобанов В.Л. Опыт проведения чересполосных постепенных рубок в насаждениях Южно-Уральского лесостепного района // Леса России и хозяйство в них, 2019. № 2 (69). С. 14–21.
- [27] Усов М.В., Белов Л.А., Залесова Е.С. Перспективность чересполосных постепенных рубок в основных лесах северной подзоны тайги // Актуальные проблемы лесного комплекса, 2019. Вып. 55. С. 53–56.
- [28] Усов М.В., Залесов С.В., Попов А.С., Чермных А.И., Стародубцева Н.И. Последствия чересполосных постепенных рубок в насаждениях сосняка бруснично-багульниково-мшистого подзоны северной тайги // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова, 2020. № 1. С. 105–113.
DOI: 10.34655/bgsha.2020.58.1.016
- [29] Залесов А.С., Помазник В.А., Грачев В.А., Сандаков О.Н. Динамика живого напочвенного покрова под влиянием чересполосной постепенной рубки на Среднем Урале // Аграрный вестник Урала, 2009. № 9 (63). С. 97–100.
- [30] Гончарова Т.И., Корепанов А.Д. Влияние чересполосно-пасечных постепенных рубок на распределе-

- ние твердых осадков, промерзание почвы, развитие подроста в хвойных насаждениях // Аграрный вестник Урала, 2012. № 1 (93). С. 51–54.
- [31] Поздеев Е.Г., Помазнюк В.А. Опыт полосно-степенных рубок в сосновых лесах Кыштымского лесхоза // Природа и лесное хозяйство Припышминских боров. Екатеринбург: УрО РАН, 1997. С. 41–43.
- [32] Об утверждении Правил санитарной безопасности в лесах: утв. Постановлением Правительства Российской Федерации от 9.12.2020 г. № 2047.
- [33] Об утверждении Перечня лесорастительных зон Российской Федерации и Перечня лесных районов Российской Федерации: утв. Приказом Минприроды России от 18.08.2014 г. № 367.
- [34] ОСТ 56-69-83 Площади пробные лесоустroительные. Методы закладки. М.: Экология. 1992. 17 с.
- [35] Бунькова Н.П., Залесов С.В., Залесова Е.С., Магасумова А.Г., Осипенко Р.А. Основы фитомониторинга. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2020. 90 с.
- [36] Данчева А.В., Залесов С.В., Попов А.С. Лесной экологический мониторинг. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2023. 146 с.
- [37] Об утверждении Правил лесовосстановления, формы, состава, порядка согласования проекта лесовосстановления, оснований для отказа в его согласовании, а также требований к формату в электронной форме проекта лесовосстановления: утв. Приказом Минприроды России от 29.12.2021 г. № 1024.
- [38] Об утверждении Правил заготовки древесины и особенностей заготовки древесины в лесничествах, указанных в ст. 23 Лесного кодекса РФ: утв. Приказом Минприроды России от 1.12.2020 г. № 993.

Сведения об авторах

Белов Леонид Александрович [✉] — канд. с.-х. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (УГЛТУ), belovla@m.usfeu.ru

Башегуров Константин Андреевич — аспирант, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (УГЛТУ), bashegurovka@m.usfeu.ru

Безденежных Ирина Владимировна — канд. с.-х. наук, начальник отдела государственной экспертизы проектов освоения лесов Управления лесного хозяйства и особо охраняемых природных территорий, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (УГЛТУ), BezdenzhnyhIV@admhmao.ru

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

Итешина Наталья Михайловна — канд. с.-х. наук, доцент, зав. кафедрой лесных культур, садово-паркового строительства и землеустройства, ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный аграрный университет» (УдГАУ), n.iteshina@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.01.2024.

Одобрено после рецензирования 22.10.2024.

Принята к публикации 31.01.2025.

FELLER-BUNCHER LP-19 SILVICULTURAL EFFICIENCY FOR ALTERNATE STRIP FELLINGS IN SECONDARY GROWTH BIRCH FORESTS

L.A. Belov¹✉, K.A. Bashegurov¹, I.V. Bezdenezhnikh¹,
S.V. Zalesov¹, N.M. Iteshina²

¹Ural State Forestry University, 37, Sibirsky tract st., 620100, Ekaterinburg, Russia

²Udmurt State Agrarian University, 11, Studentskaya st., 426069, Izhevsk, Udmurt Republic, Russia

belovla@m.usfeu.ru

The consequences of carrying out alternate strip fellings in mature and overmature secondary growth birch forests after using the LP-19 felling and bunching machine are analyzed. It was found that the strips of birch forest 10...15 m wide left for completion of growing after the first stage alternate strip felling are not damaged by the wind, and due to side lighting, a second growth of spruce and fir undergrowth is formed there. It is shown that due to the high proportion of skidding tracks and destruction of the coniferous undergrowth due to the preliminary alternate strip logging, deciduous young forest growth are formed on the cut-down areas. It is recommended to give preference to traditional cutting technologies when carrying out alternate strip logging, and when using the LP-19 feller-buncher machine, logging should be carried out in winter in order to minimize the negative effect on the soil and maximize the preservation of coniferous undergrowth. Compliance with these recommendations will make it possible to transform mature and overmature secondary growth birch forests into primary conifers without artificial reforestation.

Keywords: alternate strip logging, secondary growth birch forests, undergrowth, second growth, re-formation of foreststands

Suggested citation: Belov L.A., Bashegurov K.A., Bezdenezhnyh I.V., Zalesov S.V., Iteshina N.M. *Lesovodstvennaya effektivnost' ispol'zovaniya valочно-пакетирующей машины LP-19 pri provedenii cheresposolnykh postepennykh rubok v proizvodnykh bereznyakakh* [Feller-buncher LP-19 silvicultural efficiency for alternate strip fellings in secondary growth birch forests]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 2, pp. 18–29. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-2-18-29


References

- [1] Zalesov S.V. *Lesovodstvo* [Forestry]. Yekaterinburg: USFTU, 2020, 295 p.
- [2] Kazantsev S.G., Zalesov S.V., Zalesov A.S. *Optimizatsiya lesopol'zovaniya v proizvodnykh bereznyakakh Srednego Urala* [Optimization of forest management in secondary birch forests of the Middle Urals]. Yekaterinburg: USFTU, 2006, 156 p.
- [3] Kalachev A.A. *Pihtovye lesa yugo-zapadnogo Altaya i ih ratsional'noe ispol'zovanie* [Fir forests of the southwestern Altai and their rational use]. Almaty: Arys, 2020, 212 p.
- [4] Tsvetkov V.F. *Kamo gryadeshi. Nekotorye voprosy lesovedeniya i lesovodstva na Evropeyskom Severe* [Quo Vadis. Some issues of forest science and silviculture in the European North]. Arkhangelsk: ASTU, 2000, 254 p.
- [5] Belyaev T.A., Nagimov Z.Ya., Shevelina I.V., Sherstnev V.A. *Retrospektivniy analiz izmeneniya ploshhadi nasazhdeniy razlichnykh porod v lesnom fonde Permskogo kraya* [Retrospective analysis of changes in the area of stands of various species in the forest fund of the Perm Territory]. *Les Rossii i hozyaystvo v nih* [Forests of Russia and their management], 2019, no. 4 (71), pp. 10–17.
- [6] Opletaev A.S., Zalesov S.V. *Pereformirovanie proizvodnykh myagkolistvennykh nasazhdeniy v listvennichniki na Yuzhnom Urale* [Reformation of derivative softwood stands into larch forests in the Southern Urals]. Yekaterinburg: USFTU, 2014, 178 p.
- [7] Terinov N.N., Gerts E.F., Mekhrentsev A.V. *Primenenie prirodosbergayushhih tekhnologiy na prohodnykh rubkakh v ural'skom uchebno-m opytnom leskhozе UGLTU* [Application of nature-saving technologies in thinning in the Ural educational experimental forestry enterprise of USFTU]. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*, 2018, no. 4 (364), pp. 87–96.
- [8] Abramova L.P., Zalesov S.V., Kazantsev S.G., Luganskiy N.A., Magasumova A.G. *Rubki obnovleniya i pereformirovaniya v lesah Urala* [Renewal and reorganization felling in the forests of the Urals]. Ekaterinburg: UGFLTU, 2007, 264 p.
- [9] Agliullin F.V. *Postepennyye rubki* [Gradual felling]. Yoshkara-Ola: MarPI, 1989, 60 p.
- [10] Belov L.A., Zalesova E.S., Zalesov S.V., Kartashova T.Yu., Timerbulatov F.T. *Opyt pereformirovaniya proizvodnykh myagkolistvennykh nasazhdeniy v korennyye kedrovniki* [Experience in transforming derivative soft-leaved plantations into indigenous cedar forests]. *Vestnik Buryatskoy gosudarstvennoy sel'skohozyaystvennoy akademii im. V.R. Filippova* [Bulletin of the Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippov], 2019, no. 3 (56), pp. 87–91.
- [11] Chmyr A.F. *Struktura i ekologiya vtorichnykh listvennykh lesov na vyrubkakh i ih rekonstruktsiya* [Structure and ecology of secondary deciduous forests in clearings and their reconstruction]. St. Petersburg: SPbNIIILH, 2002, 234 p.

- [12] Zalesov S.V. *Paradoksy normativnykh dokumentov po voprosam vedeniya lesnogo hozyaystva i lesopol'zovaniya* [Paradoxes of regulatory documents on forestry and forest use]. Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa [Actual problems of the forest complex], 2018, iss. 53, pp. 18–21.
- [13] Zalesova E.S., Zalesov S.V., Opletaev A.S. *Problemy vedeniya lesnogo hozyaystva v lesah razlichnogo tselevogo naznacheniya* [Problems of forestry in forests of various purposes]. Ecobiotech, 2020, vol. 3, pp. 614–620. DOI: 10.31163/2618-964x-2020-3-4-614-620
- [14] Zalesov S., Magasumova A. Protective forest management problems in Russia. E 35 Web of Conferences Ural Environmental Science Forum Sustainable Development of Industriel Region UESF 258, 08004 (2021). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125808004>
- [15] Zalesov S.V., Surnin P.N., Bun'kova N.P., Osipenko A.E., Panin I.A., Petrov A.I. *Intensifikatsiya lesopol'zovaniya putem sovershenstvovaniya normativno-pravovykh dokumentov* [Intensification of forest management by improving regulatory documents]. Mezhdunarodniy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal [International Research J.], 2022, no. 10 (124), pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.23670/JRJ.2022.124.17>
- [16] Usov M.V., Zalesov S.V., Shubin D.A., Tolstikov A.Yu., Belov L.A. *Perspektivnost' primeneniya cherespolosnykh postepennykh rubok v sosnyakah Altaya* [Prospects of using strip gradual logging in Altai pine forests]. Agrarniy vestnik Urala [Agrarian Bulletin of the Urals], 2017, no. 1 (155), pp. 50–54.
- [17] Usov M.V. *Lesovodstvennaya effektivnost' cherespolosnykh postepennykh rubok v lentochnykh borah Altayskogo kraya* [Silvicultural efficiency of strip gradual logging in ribbon pine forests of the Altai Territory]. Dis. Cand. Sci. (Agric.) 06.03.02. Yekaterinburg, 2020, 197 p.
- [18] Zalesov S.V., Osipenko A.E., Tolstikov A.Yu., Usov M.V., Gof A.A., Savin V.V. *Vosstanovlenie i omolozhenie lentochnykh borov Altayskogo kraya* [Restoration and rejuvenation of strip pine forests of the Altai Territory]. Yekaterinburg: USFTU, 2023, 360 p.
- [19] Dancheva A.V., Zalesov S.V. *Vliyanie rubok ukhoda na biologicheskuyu ustoychivost' sosnyakov zashchitnogo naznacheniya Severnogo Kazakhstana* [Influence of thinning on protective pineries biosustainability in Northern Kazakhstan]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2022, vol. 26, no. 4, pp. 5–13. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-4-5-13
- [20] *Vremennye ukazaniya po provedeniyu polosno-postepennykh rubok v lesah pervoy gruppy* [Temporary guidelines for conducting strip-gradual logging in the forests of the first group]. Moscow: Goskomles, 1986, 4 p.
- [21] *Rukovodstvo po tekhnologii i organizatsii lesosechnykh rabot pri polosno-postepennykh rubkakh v lesah pervoy gruppy Urala* [Guide to the technology and organization of logging operations during strip-gradual felling in the forests of the first group of the Urals]. Compiled by V.A. Pomaznyuk, E.G. Pozdeev, I.E. Kainiy. Sverdlovsk, 1987, 20 p.
- [22] Pomaznyuk V.A., Pozdeev E.G. *Organizatsiya opytnykh polosno-postepennykh rubok* [Organization of experimental strip-gradual felling]. Lesnaya Promyshlennost', 1987, no. 11, pp. 14–15.
- [23] Pomaznyuk V.A., Pozdeev E.G. *Polosno-postepennyye rubki v lesah pervoy gruppy Urala* [Strip-gradual felling in the forests of the first group of the Urals]. Lesovodstvo, lesorazvedenie, lesnye pol'zovaniya [Forestry, silviculture, forest use], 1990, iss. 3, pp. 1–24.
- [24] Fedorchuk V.N., Kuznetsova M.L. *Chto takoe polosno-postepennyye rubki?* [What is strip-gradual felling?]. Lesnoe hozyaystvo [Forestry], 1993, no. 6, pp. 26–28.
- [25] Pomaznyuk V.A., Zalesov A.S., Magasumova A.G. *Vliyanie polosno-postepennykh rubok na lesovozobnovlenie v proizvodnykh bereznyakah Novolyalinskogo leskhoza* [The influence of strip-gradual logging on reforestation in secondary birch forests of the Novolyalinsky forestry enterprise]. Hvoynye boreal'noy zony [Conifers of the boreal zone], 2012, no. 3–4, pp. 303–306.
- [26] Godovalov G.A., Chermnykh A.I., Usov M.V., Lobanov V.L. *Opyt provedeniya cherespolosnykh postepennykh rubok v nasazhdeniyah Yuzhno-Ural'skogo lesostepnogo rayona* [Experience of carrying out strip-gradual logging in plantations of the South Ural forest-steppe region]. Lesa Rossii i hozyaystvo v nih [Forests of Russia and their management], 2019, no. 2 (69), pp. 14–21.
- [27] Usov M.V., Belov L.A., Zalesova E.S. *Perspektivnost' cherespolosnykh postepennykh rubok v sosnyakh severnoy podzony taygi* [Prospects of interleaved gradual logging in pine forests of the northern taiga subzone]. Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa [Actual problems of the forest complex], 2019, iss. 55, pp. 53–56.
- [28] Usov M.V., Zalesov S.V., Popov A.S., Chermnykh A.I., Starodubtseva N.I. *Posledstviya cherespolosnykh postepennykh rubok v nasazhdeniyah sosnyaka brusnichno-bagul'nikovo-mshistogo podzony severnoy taygi* [Consequences of inter-strip gradual felling in plantations of lingonberry-ledum-mossy pine forest of the northern taiga subzone]. Vestnik Buryatskoy gosudarstvennoy sel'skohozyaystvennoy akademii im. V.R. Filippova [Bulletin of the Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippov], 2020, no. 1, pp. 105–113. DOI: 10.34655/bgsha.2020.58.1.016
- [29] Zalesov A.S., Pomaznyuk V.A., Grachev V.A., Sandakov O.N. *Dinamika zhivogo napochvennogo pokrova pod vliyaniem cherespolosnoy postepennoy rubki na Srednem Urale* [Dynamics of living ground cover under the influence of strip gradual felling in the Middle Urals]. Agrarniy vestnik Urala [Agrarian Bulletin of the Urals], 2009, no. 9 (63), pp. 97–100.
- [30] Goncharova T.I., Korepanov A.D. *Vliyanie cherespolosno-pasechnykh postepennykh rubok na raspredelenie tverdykh osadkov, promerzanie pochvy, razvitie podrosta v hvoynykh nasazhdeniyah* [The influence of strip-gradual felling on the distribution of solid sediments, soil freezing, and the development of undergrowth in coniferous stands]. Agrarniy vestnik Urala [Agrarian Bulletin of the Urals], 2012, no. 1 (93), pp. 51–54.
- [31] Pozdeev E.G., Pomaznyuk V.A. *Opyt polosno-postepennykh rubok v sosnyakh lesah Kyshtym'skogo leskhoza* [Experience strip-gradual felling in the pine forests of the Kyshtym forestry enterprise]. Priroda i lesnoe hozyaystvo Pripyshtym'skiykh borov [Nature and forestry of the Pripyshtym'skiy pine forests]. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 1997, pp. 41–43.

- [32] *Ob utverzhdenii Pravil sanitarnoy bezopasnosti v lesah: Utv. Postanovleniem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 9.12.2020 g. № 2047* [On approval of the Rules for sanitary safety in forests: Approved. By the Decree of the Government of the Russian Federation of 9.12.2020, No. 2047].
- [33] *Ob utverzhdenii Perechnya lesorastitel'nyh zon Rossiyskoy Federatsii i Perechnya lesnyh rayonov Rossiyskoy Federatsii: Utv. Prikazom Minprirody Rossii ot 18.08.2014 g. № 367* [On approval of the List of forest vegetation zones of the Russian Federation and the List of forest regions of the Russian Federation: Approved. By the Order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated 18.08.2014, No. 367].
- [34] *OST 56-69–83 Ploshhadi probnye lesoustroitel'nye. Metody zakladki* [OST 56-69–83 Forest management trial areas. Methods of laying]. Moscow: Ecology, 1992, 17 p.
- [35] Bun'kova N.P., Zalesov S.V., Zalesova E.S., Magasumova A.G., Osipenko R.A. *Osnovy fitomonitoringa* [Basics of phytomonitoring]. Ekaterinburg: USLTU, 2020, 90 p.
- [36] Dancheva A.V., Zalesov S.V., Popov A.S. *Lesnoy ekologicheskiy monitoring* [Forest environmental monitoring]. Yekaterinburg: USLTU, 2023, 146 p.
- [37] *Ob utverzhdenii Pravil lesovosstanovleniya, formy, sostava, poryadka soglasovaniya proekta lesovosstanovleniya, osnovaniy dlya otказа v ego soglasovanii, a takzhe trebovaniy k formatu v elektronnoy forme proekta lesovosstanovleniya: Utv. Prikazom Minprirody Rossii ot 29.12.2021 g. № 1024* [On approval of the Rules for forest restoration, form, composition, procedure for coordinating a forest restoration project, grounds for refusing to approve it, as well as requirements for the format of the electronic form of the reforestation project: Approved. By Order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated 29.12.2021. No. 1024].
- [38] *Ob utverzhdenii Pravil zagotovki drevesiny i osobennostey zagotovki drevesiny v lesnichestvah, ukazannyh v st. 23 Lesnogo kodeksa RF: Utv. Prikazom Minprirody Rossii ot 1.12.2020 g. № 993* [On approval of the Rules for timber harvesting and the specifics of timber harvesting in forestry areas specified in Art. 23 of the Forest Code of the Russian Federation: Approved. by Order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated 1.12.2020 No. 993].

Authors' information

Belov Leonid Aleksandrovich  — Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor of the Ural State Forestry University, belovla@m.usfeu.ru

Bashegurov Konstantin Andreevich — pg. of the Ural State Forestry University, bashegurovka@m.usfeu.ru

Bezdenzhnykh Irina Vladimirovna — Cand. Sci. (Agriculture), Head of the Department of State Expertise of Forest Development Projects; Ural State Forestry University, BezdenzhnykhIV@admhmao.ru

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

Iteshina Natal'ya Mikhaylovna — Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor, Head of the Department of Forest Crops, Landscape Gardening and Land Management of the Udmurt State Agrarian University, n.iteshina@yandex.ru

Received 16.01.2024.

Approved after review 22.10.2024.

Accepted for publication 31.01.2025.

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

ВЫРАЩИВАНИЕ САЖЕНЦЕВ ДЕРЕВЬЕВ РОДА *POPULUS* В ГОРНО-ЛЕСНОЙ ЗОНЕ ЮЖНОГО УРАЛА

А.Р. Шамсутдинова[✉], Р.Р. Султанова, Р.Ф. Мустафин

ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет», Россия, 450001, г. Уфа,
ул. 50-летия Октября, д. 34

shamsutdinova.alya2015@yandex.ru

Рассмотрены ключевые аспекты формирования быстрорастущих лесных насаждений, как эффективного и экономически выгодного метода для смягчения последствий изменения климата и декарбонизации территории Республики Башкортостан. Установлено, что деревья рода *Populus* являются одними из наиболее активно поглощающих диоксид углерода среди древесных пород. Приведены показатели роста и приживаемости черенков деревьев тополя пирамидального *Populus nigra* Var. × *Italica Du Roi*. Представлена характеристика зависимости биометрических показателей укорененных черенков от соблюдения поливной нормы в горно-лесной лесорастительной зоне Республики Башкортостан. Подробно описан процесс подготовки и посадки черенков. Определены средние значения длины корней второго порядка и выявлена их вариабельность в течение вегетационного периода как при выполнении поливной нормы, так и без полива. Полученные результаты подтверждают высокие показатели роста укорененных черенков при соблюдении поливной нормы по сравнению с естественными условиями. Результаты исследования корневой системы тополя пирамидального *Populus nigra* Var. × *Italica Du Roi* прибором Имаджер CI-600 без извлечения саженцев из почвы так же подтверждают формирование хорошо развитых корней в условиях эксперимента. Результаты исследований о влиянии соблюдения поливной нормы можно использовать при лесоразведении и управлении лесными ресурсами в регионе. **Ключевые слова:** черенки, саженцы, лесничество, тополь, посадка, корни, норма полива

Ссылка для цитирования: Шамсутдинова А.Р., Султанова Р.Р., Мустафин Р.Ф. Выращивание саженцев деревьев рода *Populus* в горно-лесной зоне Южного Урала // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 2. С. 30–41. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-2-30-41

Выбросы парниковых газов с преобладанием диоксида углерода CO_2 являются серьезной проблемой в функционировании природных экосистем, приводя к таким негативным последствиям, как глобальное изменение климата, усиление парникового эффекта и т. д. [1–4]. Актуальным вопросом использования природных ресурсов в области лесного хозяйства служит управление потоками углерода в целях сокращения выбросов CO_2 , увеличения их секвестрации и перераспределения во времени и пространстве [5]. Леса, активно поглощающие CO_2 из атмосферы и удерживающие его в наземной биомассе, имеют важное значение для смягчения негативных последствий выбросов диоксида углерода. Связывание углерода деревьями рассматривают как одну из основных функций лесных экосистем [6–8]. Рациональное ведение лесного хозяйства, охрана лесов, лесоразведение, лесовосстановление и создание плантаций на основе быстрорастущих древесных пород составляют ключевое направление в декарбонизации территорий и поддержания уровня CO_2 в установленной норме.

В условиях растущего спроса на древесину актуальность приобретает селекция быстрорастущих стрессоустойчивых генотипов тополя пирамидального в качестве средства повышения продуктивности и устойчивости лесов. Адаптация к абиотическим стрессам имеет решающее значение для выживания древесных растений. Тополь является буферной древесной культурой, которая увеличивает поглощение атмосферных загрязнителей, способствует разложению органических соединений, снижает риск эрозии и вымывания почв. Это наиболее быстрорастущее древесное растение, широко распространенное в Российской Федерации. Тополь выращивается на лесопромышленных плантациях для городского озеленения, защитных насаждений в сельских населенных пунктах, а также для посадки вдоль дорожного полотна и по берегам рек, периметру оврагов.

Работа по научному обоснованию создания быстрорастущих плантаций, способствующих снижению количества CO_2 в атмосфере, ведется в Республике Башкортостан с 2021 г. в рамках деятельности Евразийского климатического консорциума (<https://eurasianclimate.ru/o-consorciume>).

Тополь обладает абсолютным приоритетом в создании таких специализированных плантаций среди древесных пород. Благодаря своей уникальной генетике и биологическим особенностям тополь выступает оптимальным выбором для создания лесных продуктивных плантаций, способствующих улучшению экологической обстановки. Они отличаются высокой способностью поглощать углерод: спелые и перестойные насаждения тополя накапливают до 2,22 (в некоторых районах до 3,6) т CO₂ в год в пересчете на 1 га. Быстрый рост деревьев рода *Populus*, их большая биомасса позволяют создавать древесные плантации с короткой ротацией, особенно на неиспользуемых сельскохозяйственных ландшафтах с богатыми почвами, интенсивно депонирующих атмосферный углерод наземной и подземной биомассой [9, 10].

Китайские ученые предполагают, что в будущих климатических сценариях центр видового разнообразия *Populus* имеет тенденцию к расширению на северо-восток и северо-запад [11]. Высокая экологическая адаптивность и сильная холодостойкость *Populus* важны для географического распространения и выживания этих деревьев в экстремальных сезонных климатических условиях [12]. В Китае клонированные тополя используются для крупномасштабного дешевого производства древесины на плантациях с коротким оборотом. Этому способствуют высокие темпы роста гибридов тополя. Особое внимание уделяется плантационному выращиванию гибридов тополя, а также изучению корневых систем. Поскольку стеблевые черенки тополя могут образовывать придаточные корни, что очень важно для укоренения и приживаемости этих деревьев, их способность к клоновому размножению широко используется в лесоводственной практике. Укоренение придаточных корней у различных видов *Populus* является основной особенностью их использования в селекционных программах на протяжении многих лет.

Исследования тополя ведутся в различных направлениях. Хорошие результаты получены при фитоэкстракции кадмия на умеренно загрязненных почвах. Однако на сильно загрязненных почвах его рассматривают только как фитостабилизатор. Некоторые исследования посвящены глобальному воздействию гибридных тополей на окружающую среду, поскольку этот вид признан экономически и экологически привлекательным для производства биомассы с короткой ротацией. Изучается реакция растений на солевые реагенты, что показывает фенотипическую адаптацию деревьев рода *Populus* к солевому стрессу. Проводятся также исследова-

Т а б л и ц а 1
Баланс углерода в лесах Республики Башкортостан, тыс. т/год
Carbon balance in forests of the Republic of Bashkortostan, thousands tons/year

Индикатор	Баланс углерода, С тыс. т/га	
	2008	2018
Поглощение		
Надземная биомасса древостоя	3032,2	2763
Мертвая древесина	506,8	468
Лесная подстилка	82,5	87,9
Почва	281,3	300,2
Общее поглощение	3902,7	3618,9
Потери		
Разрушительные лесные пожары	20,9	18,9
Энтомо- и фитофаги	5,1	15,6
Черенки	511,5	720,7
Общие потери	537,5	755,2
Углеродный бюджет		
Надземная биомасса древостоя	263,9	2,475,2
Мертвая древесина	427,3	354
Лесная подстилка	68,8	68,3
Почва	230,1	227
Общий бюджет на выбросы углерода	3365,2	3124,4

ования морфологических и физиологических параметров саженцев гибридов осины *in vitro*, которые свидетельствуют о зависимости продуктивности саженцев от интенсивности световых обработок.

Лесоразведение — эффективный хозяйственный способ, замедляющий негативные последствия, вызванные изменениями климата. Потенциал поглощения углерода пахотными землями в Европе может достичь 7,29 т/га год, если создать в их пределах лесные насаждения. Максимальное использование углеродного потенциала лесного хозяйства и участие производителей в углеродных лесных программах может их вознаградить так называемыми углеродными кредитами, которые выдаются организациям, стремящимся компенсировать выбросы CO₂.

Древесные растения аккумулируют до 60 % углерода суши, а его содержание в различных частях дерева достигает 45...50 %.

Леса Республики Башкортостан в среднем поглощают от 3618,9 до 3902,7 тыс. т/год. При сокращении площади лесов в результате рубок или пожаров, гибели от энтомо- и фитофагов по-

Т а б л и ц а 2

**Поглощение диоксида углерода лесными насаждениями по группам
возраста и породам деревьев, тыс. т/год на 1 га (Республика Башкортостан)**

**CO₂ uptake by forest plantations by age groups and tree species, tons per 1 ha per year
(Republic of Bashkortostan)**

Группа	Порода	Возрастная группа				Всего
		I	II	III	IV, V	
Хвойные	Сосна	1700	970	170	950	800
	Ель	1220	660	140	1190	800
	Пихта	1020	490	50	600	540
	Лиственница	1540	560	200	520	700
Всего по хвойным		1290	560	140	810	710
Твердолиственные	Дуб посевной	1340	170	200	760	660
	Веgetативный дуб	1800	1130	550	2220	630
	Вяз, клен, ясень	1010	270	80	740	640
Всего по твердолиственным		1390	520	280	1250	640
Мягколиственные	Береза	1380	1030	140	1490	1010
	Осина, тополь	1380	1120	810	2221	1380
	Ольха, липа, ива	1540	1020	440	1940	1230
Всего по мягколиственным		1430	1060	460	1880	1210

тери CO₂ составляют от 537,5 до 755,2 тыс. т/год. Поглощение углерода лесами превышает его потери, о чем свидетельствует бюджет углерода от 3124,4 до 3365,2 тыс. т/год. Однако с 2008 г. поглощение углерода снизилось вследствие увеличения площади заросших лесов, участвовавших лесных пожаров, болезней и окончательных рубок (табл. 1).

Формирование быстрорастущих лесных насаждений может существенно сократить негативное воздействие техногенного загрязнения атмосферы на окружающую среду, не только способствуя улучшению качества воздуха, но и обеспечивая значительную экономическую выгоду. Посадка деревьев и создание лесных массивов будет способствовать секвестрации диоксида углерода, который является одной из основных причин изменения климата. Кроме того, лесные насаждения сохраняют биоразнообразие, помогут предотвратить почвенную эрозию и создадут благоприятные условия для жизни животной фауны. В целом, увеличение площади лесов определяется как стратегически важный шаг в области охраны окружающей среды и устойчивого функционирования территорий в системе их низкоуглеродного развития [13–17].

Особого внимания заслуживает изучение углеродопоглощающей способности различных древесных видов. Мягколиственные породы, характерные для местного лесного фонда,

поглощают до 4930,2 тыс. т/год. Лидируют спелые деревья рода *Populus*, поглощающие диоксид углерода до 3,6 тыс. т/год на 1 га. Для остальных пород этот показатель значительно ниже (табл. 2). По мнению некоторых исследователей, поглощение диоксида углерода у тополя в 3 раза интенсивнее, чем у липы, дуба или сосны [18–25].

Формирование саженцев из черенков тополя и их адаптация к условиям среды зависят от системы укоренения. Нами проведено укоренение черенков деревьев тополя пирамидального *Populus Nigra Var. × Italica Du Roi*, вида, выведенного в Республике Башкортостан. Это зимостойкое, быстрорастущее, узкоколоновидное, листопадное дерево с треугольными блестящими листьями длиной до 10 см, желтеющими осенью, достигающее высоты более 30 м. Соблюдение технологии посадки черенков и последующий уход имеют ключевое значение в деле сохранения генетической преемственности и содействия быстрой приживаемости растений, способствуют поддержанию стабильных характеристик тополя, повышению устойчивости к болезням и максимальному использованию экологических преимуществ этого вида деревьев. Кропотливая работа по выращиванию тополя с соблюдением всех необходимых процессов, учетом имеющихся лесорастительных условий позволяет создать благоприятную среду для его развития,

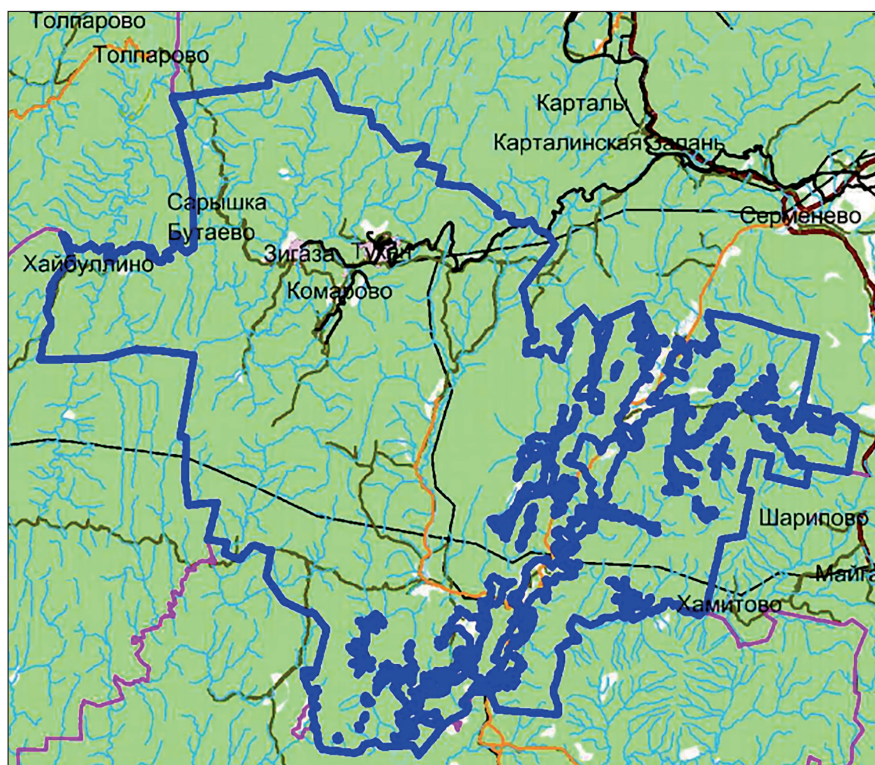


Рис. 1. Карта-схема Авзянского лесничества
 Fig. 1. Map-scheme of Avzyansk forestry

обеспечивая долговечность и адаптацию к окружающей среде. В результате оптимальной технологии укоренения черенков *Populus Nigra Var. × Italica Du Roi* и последующего ухода за ними, формируется посадочный материал для создания искусственных насаждений с целевой функцией и желаемыми характеристиками, обеспечивающими как экологические, так и экономические преимущества. Тополь, будучи породой с высокой интенсивностью жизнедеятельности и устойчивостью к изменению климата не выносит участки с застойным избыточным увлажнением, в частности болотные почвы со стоячей водой, плохой аэрацией. Напротив, влажные и сырые почвы с проточной водой, оптимальные по увлажнению, благоприятны для влаголюбивых и требовательных к аэрации деревьев этого вида. Использование данного быстрорастущего вида с большой наземной биомассой ведет улучшению микроклиматических условий территории.

Цель работы

Цель работы — оценка приживаемости черенков *Populus Nigra Var. × Italica Du Roi* в условиях юго-восточной части Республики Башкортостан.

Объекты и методы исследования

Участок, где поведены исследования по укоренению черенков тополя *Populus Nigra Var. × Italica Du Roi*, находится на территории Республики Башкортостан в Белорецком районе — Авзянское лесничество, Узьянское участковое лесничество, квартал № 162, географические координаты [N 53°672543, E 57°850199], [N 53°671997, E 57°851508], [N 53°671298 E 57°850542], [N 53°671895, E 57°849190] (рис. 1).

Природные условия указанного участка подробно представлены в лесоустроительных материалах и научных трудах [26, 27]. Рельеф местности — ровный, с небольшим уклоном в 2° к руслу р. Белая. Гидрологические объекты территории характеризуются снеговым питанием, суммарный годовой сток в среднем составляет 4,3 км², т. е. 17 % всех водных ресурсов региона. Климат — умеренно-холодный и полусухой с годовой суммой активных температур 2000 °С и годовой суммой осадков 400...500 мм. Почвы горно-лесные светло-серые.

Побеги на черенки были заготовлены после листопада поздней осенью из наиболее развитых побегов, поскольку у них лучшая проводящая система по сравнению с иными видами [28–33]. Для хранения срезанных побегов на дно траншеи насыпали слой песка, пучки



Рис. 2. Заготовленные черенки тополя
Fig. 2. Prepared poplar cuttings



Рис. 3. Посадка черенков
Fig. 3. Cuttings planting



Рис. 4. Процесс полива
Fig. 4. The watering process

побегов располагали вертикально. Затем траншею засыпали слоем почвы и сформировали дренажные канавки. Перед укладкой черенки соединяли в пучки по 50...100 шт. [33–36]. На каждом пучке была маркирована информация о количестве, ботаническом виде и разновидности черенков (рис. 2).

Черенки нарезали на станке с механическим приводом. В соответствии с ГОСТ 17267–71 длина черенков составляла 20...25 см и диаметр в верхней части — 0,6...2,0 см. Верхний срез делали горизонтальным над почкой, из которой в дальнейшем развивался побег, а нижний срез — под почкой под углом 45°.

Перед посадкой нижние участки черенков освежали, далее их замачивали в воде с гетероауксином на 4...6 ч перед посадкой. В качестве метода предпосадки черенков применяли кильчевание, которое предусматривало размещение пучков черенков в теплице на 2–3 недели базальной частью вверх с покрытием тонким слоем песка до 5–7 см. Песок нагревается солнцем, что приводит к образованию каллуса на нижних участках и началу развития корней.

В отделении черенковых саженцев (так же, как и в других отделениях лесного питомника) применяются севообороты — чистый, сидеральный занятый пар. Основную вспашку почвы проводили на 30...40 см плугом без отвалов на глубину посадки черенков. В процессе посадки черенки размещали в трехрядной ленте. Ленты располагали на расстоянии 70 см одна от другой, ряды внутри лент — на расстоянии 40 см один от другого. Шаг посадки составил 10...20 см (0,4×0,4×0,7 м). При посадке у черенков над поверхностью почвы оставляли одну почку (рис. 3).

Уход за высаженными черенками в открытом грунте предусматривал рыхление почвы, удаление сорняков и полив. За вегетационный период в междурядьях трижды проводили рыхление почвы культиваторами КРСШ-2,8А и КРН-2,8А. Для борьбы с сорняками в посадках тополя вносили раствор гербицида, содержащего прометрин, из расчета 3 кг/га, смешанный с 600...800 дм³ воды. Нанесение осуществлялось с помощью опрыскивателя ПОУ типа ГАН-8.

Норму полива определяли исходя из уровня влажности почвы на глубине 30...40 см (рис. 4). Полив осуществляли каждые 20 сут. с промачиванием почвы на глубину 20...30 см теплой водой вечером [37–40]. Поливная норма составила 500...600 м³ на 1 га. После полива почву обязательно рыхлили.

Для определения показателей сформировавшейся корневой системы в сентябре провели выборочную выкопку укорененных черенков



Рис. 5. Отбор образцов саженцев
Fig. 5. Seedling sampling process

(саженцев). Выполнили отмывку корней и замер биометрических показателей (рис. 5).

Для исследований использовали прибор Имаджер СИ-600 миниризонотрон, неразрушающий сканер, позволяющий проводить измерения параметров корневой системы растений непосредственно в месте посадки без извлечения с грунта. Сканер состоит из сканирующего модуля и прозрачной почвенной (корневой) трубки стандартной длины 105 мм. Во время работы сканирующий модуль вставляли в трубку, которую предварительно погружали в грунт.

Результаты и обсуждение

В ходе исследования были определены количество листьев, высота укорененных черенков *Populus Nigra Var. × Italica Du Roi*, длина главных и боковых корней и масса саженцев при соблюдении технологии ухода (табл. 3). С мая по сентябрь высота укорененных черенков достигла в среднем 532,5 мм. Средняя длина главного корня — 185 мм, среднее количество боковых корней — 11 шт., средняя длина бокового корня — 30,79 мм.

Определены средние показатели укорененных черенков без ухода (табл. 4). С мая по сентябрь они достигали высоты 454 мм. Средняя длина главного корня — 143 мм, среднее количество боковых корней — 9 шт., средняя длина бокового корня — 24,81 мм.

По среднему значению коэффициента вариации (%) критическое значение t -критерия Стьюдента при данном числе степеней свободы составляет 12,7, т. е. $t_{\text{табл}} > t_{\text{крит}}$ или изменения признака статистически значимы ($p = 0,016$).

Т а б л и ц а 3

Характеристика саженцев при условии ухода и расчета поливных норм
Characterization of seedlings under condition of care and calculation of irrigation rates

Длина главного корня, мм	Количество листьев, шт.	Длина корней 2-го порядка, мм	Коэффициент вариации V , %	Среднее квадратическое отклонение σ , мм	Высота саженца, мм	Масса саженца, г
155	9	43,00 ± 9,08	70,06	30,12	465	25
157	19	27,26 ± 5,19	80,69	22	410	24
160	14	53,00 ± 10,42	52,02	25,79	480	28
170	2	27,40 ± 7,39	53,29	14,77	475	27
172	17	22,90 ± 4,94	64,65	14,81	470	29
185	15	17,33 ± 3,86	49,85	8,64	620	30
200	12	23,50 ± 4,71	66,41	15,61	580	30
210	19	34,83 ± 4,91	46,77	16,29	600	33
215	12	27,40 ± 5,64	61,73	16,04	630	32
230	15	31,29 ± 8,30	95,62	29,92	595	35
Среднее значение						
185	13	30,79 ± 6,44	64,17	19,40	532,5	29,3

Т а б л и ц а 4

Характеристика саженцев при условии приживаемости без ухода
при естественных климатических условиях
Characteristics of seedlings under the condition of rooting without care under natural climatic conditions

Длина главного корня, мм	Количество листьев, шт.	Длина корней 2-го порядка, мм	Коэффициент вариации V , %	Среднее квадратическое отклонение σ , мм	Высота саженца, мм	Масса саженца, г
100	17	15,11 ± 4,99	93,38	14,11	395	25
115	6	18,50 ± 2,76	44,74	8,28	375	23
120	12	18,17 ± 5,40	66,46	12,07	380	18
121	6	14,22 ± 3,10	61,68	8,77	400	22
135	9	23,20 ± 4,87	62,98	14,61	420	20
155	20	24,62 ± 4,47	62,86	15,47	465	28
160	19	28,89 ± 10,29	100,73	29,1	510	34
170	7	55,14 ± 11,86	52,68	29,05	490	26
175	10	28,13 ± 6,29	59,2	16,65	530	32
180	12	22,20 ± 5,15	69,62	15,45	575	31
Среднее значение						
143	12	24,81±5,92	67,43	16,36	454	25,9

По среднему количеству листьев критическое значение t -критерия Стьюдента при данном числе степеней свободы составляет 12,7, т. е. $t_{\text{табл}} > t_{\text{крит}}$ или изменения признака статистически значимы ($p = 0,025$). По средней ошибке средней арифметической длины корней второй очереди критическое значение t -критерия Стьюдента при данном числе степеней свободы составляет 12,7, т. е. $t_{\text{табл}} > t_{\text{крит}}$ или изменения признака статистически значимы ($p = 0,027$).

По средней массе саженцев критическое значение t -критерия Стьюдента при данном числе степеней свободы составляет 12,7, т. е. $t_{\text{табл}} > t_{\text{крит}}$ или изменения признака статистически значимы ($p = 0,039$). Оценка развития корневой системы с использованием прибора Имаджер СИ-600 миниризонотрон показала более точную картину развития корневой системы саженцев (рис. 6).

С помощью прибора были получены цифровые изображения корней, корневых волосков и

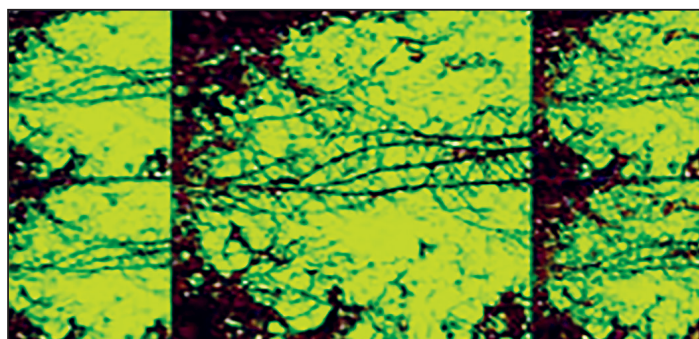


Рис. 6. Сканер Имаджер CI-600
Fig. 6. Imager CI-600 scanner

микоризы непосредственно в грунте, размеры которых отличаются статистически незначимо от показателей, полученных при непосредственном измерении корней извлеченных из грунта растений. Полученные изображения имеют высокий уровень разрешения и выполнены в цвете. Прибор позволяет вести наблюдения за процессом роста корней и их развитием в течение всего периода научного исследования без извлечения черенков.

При изучении формирования саженцев *Populus nigra* Var. × *Italica Du Roi* в условиях Белорецкого лесничества определены следующие значения показателя приживаемости k : при поливной норме 500...600 м³ на 1 га $k = 89$ %; контрольный участок без полива — $k = 41$ %. Приживаемость более 82 % соответствуют нормативному значению, установленному для Республики Башкортостан. Полученные данные позволяют судить об успешной приживаемости саженцев при условии выполнения технологии ухода весь период вегетации.

Выводы

Проведенные экспериментальные исследования по укоренению черенков *Populus nigra* Var. × *Italica Du Roi* в условиях Белорецкого лесничества позволили получить в конце вегетационного сезона лучшие показатели роста корневой системы укоренившихся черенков тополя в варианте выращивания, при условии, установления поливной нормы, что свидетельствует о возможности ускоренного целевого выращивания саженцев деревьев *Populus nigra* Var. × *Italica Du Roi* в Республике Башкортостан для лесовосстановления и декарбонизации территорий. Использование саженцев из укоренившихся черенков в лесоразведении и искусственном лесовосстановлении обеспечивает быстрое размножение элитных клонов тополя

и создание насаждений с высокой углеродопонирующей способностью.

Дальнейшие исследования сосредоточены на оптимизации роста и развития саженцев тополя с целью реализации их потенциальной экологической продуктивности.

Список литературы

- [1] Raihan A., Said M.N.M. Cost-benefit analysis of climate change mitigation measures in the forestry sector of Peninsular Malaysia // *Earth Systems and Environment*, 2022, no. 6(2), pp. 405–419. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00241-6>
- [2] Raihan A., Begum R.A., Mohd Said M.N., Abdullah S.M.S. A review of emission reduction potential and cost savings through forest carbon sequestration // *Asian J. of Water Environment and Pollution*, 2019, no. 16(3), pp. 1–7. <https://doi.org/10.3233/AJW190027>
- [3] Raihan A., Begum R.A., Mohd Said M.N., Pereira J.J. Assessment of carbon stock in forest biomass and emission reduction potential in Malaysia // *Forests*, 2021, no. 12(10), p. 1294. <https://doi.org/10.3390/f12101294>
- [4] Raihan A., Begum R.A., Said M.N.M., Abdullah S.M.S. Climate change mitigation options in the forestry sector of Malaysia // *Jurnal Kejuruteraan*, 2018, no. 1(6), pp. 89–98.
- [5] Mack M.C., Walker X.J., Johnstone J.F., Alexander H.D., Melvin A.M., Jean M., Miller S.N. Carbon loss from boreal forest wildfires offset by increased dominance of deciduous trees // *Science*, 2021, no. 372(6539), pp. 280–283. <https://doi.org/10.1126/science.abf3903>
- [6] Dumitrașcu M., Kucsicsa G., Dumitrică C., Urșanu Popovici E. A., Vrînceanu A., Mitrică B., Mocanu I., Șerban P.R. Estimation of future changes in aboveground forest carbon stock in Romania. A prediction based on forest-cover pattern Scenario // *Forests*, 2020, no. 11(9), p. 914. <https://doi.org/10.3390/f11090914>
- [7] Zhu W., Sang Y.L., Zhu Q., Duan B., Wang Y. Morphology and longevity of different-order fine roots in poplar (*Populus* × *euramericana*) plantations with contrasting forest productivities // *Canadian J. of Forest Research*, 2018, no. 48(6), pp. 611–620. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2017-0296>

- [8] Zhu Y., Feng Z., Lu J., Liu J. Estimation of forest biomass in Beijing (China) using multisource remote sensing and forest inventory data // *Forests*, 2020, no. 11(2), pp. 163. <https://doi.org/10.3390/f11020163/>
- [9] Потапенко А.М., Лазарева М.С., Сторожишина К.М. Восстановление широколиственных лесов, созданных в порядке реконструкции малоценных лесных насаждений лесокультурным методом // *Труды БГТУ. Сер. 1*, 2020. № 1. С. 69–74.
- [10] Urbanization, Biodiversity and Ecosystem Services: Challenges and Opportunities. Springer Dordrecht: Heidelberg-New-York-London, 2013, 754 p. DOI: 10.1007/978-94-007-7088-1_10
- [11] Wang F., Xiong Z., Dai X., Li Y., Wang, L. The response of the species diversity pattern of *Populus* to climate change in China // *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2028, p. 116. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102858>
- [12] Zhou B., Kang Y., Leng J., Xu Q. Genome-wide analysis of the miRNA-mRNAs network involved in cold tolerance in 2019. <https://doi.org/10.3390/genes10060430>
- [13] Луганский Н.А., Залесов С.В., Щавровский В.А. Повышение продуктивности лесов. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 1995. 297 с.
- [14] Моисеев Н.А. Экономика лесного хозяйства. М.: МГУЛ, 2006. 384 с.
- [15] Назаренко И.Н. Экономическая организация воспроизводства лесных ресурсов // *Вестник Алтайской академии экономики и права*, 2019. № 4–1. С. 113–117.
- [16] Петров А.П., Ильин В.А., Николаева Г.Н. Экономика лесного хозяйства. М.: Экология, 1993, С. 20.
- [17] Пирс П.Х. Введение в лесную экономику. М.: Экология, 1992. 224 с.
- [18] Царев А.П., Плугатарь В., Царева Р.П. Селекция и сортоиспытание тополей. Симферополь: АРИАЛ, 2019. С. 252.
- [19] Петрова Г.А., Калашникова Е.А., Мухаметшина А.Р. Анализ роста осины (*Populus tremula* L.), полученной методом *in vitro* в условиях Республики Татарстан // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2022. Т. 26. № 5. С. 15–22. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-5-15-22
- [20] Багаев С.С. Об оставлении на корню фауной осины при рубках смешанных лесных насаждений // *Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства*, 2013. № 1. С. 11–18.
- [21] Блонская Л.Н., Султанова Р.Р., Муфтахова С.И., Мартынова М.В., Конашова С., Сабирзянов И.Г., Тимерьянов А.Х., Ханова Е., Ишбирдина Л., Одинцов Г.В. Биологические показатели тополя башкирского Ломбардия (*Populus nigra* L. × *Populus nigra* var. *Italica Du Roi*) в городских ландшафтах // *Болгарский журнал сельскохозяйственной науки*, 2019. № 25 (S2). С. 30–36.
- [22] Kim T.L., Chung H., Veerappan K., Lee W.Y., Park D., Lim H. Physiological and transcriptome responses to elevated CO₂ concentration in *Populus* // *Forests*, 2021, no. 12(8), p. 980. <https://doi.org/10.3390/f12080980>
- [23] Yu X., Lu B., Dong Y., Li, Y., Yang M. Cloning and functional identification of PeWRKY41 from *Populus* × *euramericana* pp. // *Industrial Crops and Products*, 2022, no. 175, p. 114. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114279>
- [24] Tullus A., Rytter L., Tullus T., Weih M., Tullus H. Short-rotation forestry with hybrid aspen (*Populus tremula* L. × *P. tremuloides* Michx.) in Northern Europe // *Scandinavian J. of Forest Research*, 2012, no. 27(1), pp. 10–29. <https://doi.org/10.1080/02827581.2011.628949>
- [25] Богданов П.Л. Тополя и их культура. М.: Лесная пром-сть, 1965. 104 с.
- [26] Лесохозяйственный регламент Авзянского лесничества Республики Башкортостан. 2018 год. Ч. 1, 2018. 46 с.
- [27] Мукатанов А.Х. Лесные почвы Башкортостана. Уфа: Гилем, 2002, 263 с.
- [28] Сарсекова Д.Н. Выращивание плантационных тополевых культур на юго-востоке Республики Казахстан // *Леса России и хозяйство в них*, 2009. № 2 (32). С. 45–48.
- [29] Hemmati S., Gatmiri B., Cui Y.J., Vincent M. Validation d'un modèle d'extraction d'you par des racines d'arbre implanté dans θ-stoc // *Comptes Rendus du XVII éme Congrès international de mécanique des sols et d'ingénierie géotechnique*. Alexandrie, Egipte, 5–9 October, 2009. Alexandrie, 2009, pp. 890–915.
- [30] Ключников Ю.В. Посадка и выращивание защитных лесных полос. Воронеж: Воронежское областное издательство, 1948, 59 с.
- [31] Вавин В.С., Рымарь В.Т., Ахтямов А.Г. Создание долговечных лесных насаждений в условиях юго-востока ЦЧП. Воронеж: Изд-во ГНУ НИИСХ ЦЧП им. В.В. Докучаева, 2007. 246 с.
- [32] Царев А.П. Рекомендации по выращиванию насаждений тополя в юго-восточной части европейской территории РСФСР. Воронеж: Изд-во ЦНИИЛГиС (ВНПО «Союзлесселекция»), 1986. 37 с.
- [33] Царев А.П., Погиба С.П., Лаур Н.В. Селекция лесных и декоративных древесных растений / под общ. ред. А.П. Царева. М.: МГУЛ, 2014. 552 с.
- [34] Клейн Р.М., Клейн Д.Т. Методы исследования растений. М.: Колос, 1974. С. 46–58.
- [35] Low J.E., Åslund M.L.W., Rutter A., Zeeb B.A. Effect of pruning and nodal adventitious roots on the uptake of polychlorinated biphenyls by *Cucurbita pepo* grown under field conditions // *Environmental Pollution*, 2011, no. 159(3), pp. 769–775. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.11.015>
- [36] Bellamine J., Penel C., Greppin H., Gaspar T. Confirmation of the role of auxin and calcium in the late phases of adventitious root formation // *Plant Growth Regulation*, 1998, no. 26, pp. 191–194. <https://doi.org/10.1023/A:1006182801823>
- [37] Singh B., Gill R.E.S. Carbon uptake and nutrient export by some tree species in an agroforestry system in Punjab, India // *Grassland Management and Agroforestry*, 2014, no. 35(1), pp. 107–114.
- [38] Шумаков Б.Б., Кирейчева Л.В. Экологические аспекты мелиорации // *Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук*, 1994. № 4. С. 46–51.
- [39] Богданов П.Л. Дендрология. М.: Лесная пром-сть, 1974. 240 с.
- [40] Примак Р. Основы сохранения биоразнообразия. М.: Изд-во УНЦ ДО МГУ, 2002. 256 с.

Сведения об авторах

Шамсутдинова Алия Руслановна✉ — аспирант, ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет», shamsutdinova.alya2015@yandex.ru

Султанова Рида Разябовна — д-р с.-х. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет», vestnik-bsau@mail.ru

Мустафин Радик Флюсович — д-р с.-х. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет», mustafin-1976@mail.ru

Поступила в редакцию 16.02.2024.

Одобрено после рецензирования 20.09.2024.

Принята к публикации 05.02.2025.

CULTIVATION OF SEEDLINGS (GENUS *POPULUS*) IN SOUTHERN URALS MOUNTAIN-FOREST ZONE

A.R. Shamsutdinova✉, **R.R. Sultanova**, **R.F. Mustafin**

Bashkir State Agrarian University, 34, 50-letiya Oktyabrya st., 450001, Ufa, Russia

shamsutdinova.alya2015@yandex.ru

Key aspects of fast-growing forest plantation formations as an effective and cost-effective method to mitigate the effects of climate change and decarbonisation in the territory of the Republic of Bashkortostan are considered. It is established that trees of *Populus* genus are one of the most actively absorbing carbon dioxide among tree species. The growth and rooting index of lombardy poplar *Populus Nigra* Var. × *Italica Du Roi* cuttings is shown. The detailed assessment of rooted cuttings biometric indices dependence on compliance with irrigation norms in the mountain-forest forest zone of the Republic of Bashkortostan is presented. The preparation and planting of cuttings process is described in detail. The average values of the roots length of second-order were determined and their variability during the growing season was revealed both at fulfilment of irrigation norm and without irrigation. The obtained results confirm high growth rates of rooted cuttings under the irrigation norm compared to natural conditions. The results of the study of the root system of lombardy poplar *Populus nigra* Var. × *Italica Du Roi* using Imager CI-600 without removing seedlings from the soil also confirm the formation of well-developed roots in the experimental conditions. The results of studies on the impact of irrigation compliance can be used in afforestation and forest management in the region.

Keywords: cuttings, seedlings, forestry, poplar, planting, roots, watering

Suggested citation: Shamsutdinova A.R., Sultanova R.R., Mustafin R.F. *Vyrashchivanie sazhentsev derev'ev roda Populus v gorno-lesnoy zone Yuzhnogo Urala* [Cultivation of seedlings (genus *Populus*) in Southern Urals mountain-forest zone]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 2, pp. 30–41. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-2-30-41

References

- [1] Raihan A., Said M.N.M. Cost–benefit analysis of climate change mitigation measures in the forestry sector of Peninsular Malaysia. *Earth Systems and Environment*, 2022, no. 6(2), pp. 405–419. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00241-6>
- [2] Raihan A., Begum R.A., Mohd Said M.N., Abdullah S.M.S. A review of emission reduction potential and cost savings through forest carbon sequestration. *Asian J. of Water Environment and Pollution*, 2019, no. 16(3), pp. 1–7. <https://doi.org/10.3233/AJW190027>
- [3] Raihan A., Begum R.A., Mohd Said M.N., Pereira J.J. Assessment of carbon stock in forest biomass and emission reduction potential in Malaysia. *Forests*, 2021, no. 12(10), p. 1294. <https://doi.org/10.3390/f12101294>
- [4] Raihan A., Begum R.A., Said M.N.M., Abdullah S.M.S. Climate change mitigation options in the forestry sector of Malaysia. *Jurnal Kejuruteraan*, 2018, no. 1(6) pp. 89–98.
- [5] Mack M.C., Walker X.J., Johnstone J.F., Alexander H.D., Melvin A.M., Jean M., Miller S.N. Carbon loss from boreal forest wildfires offset by increased dominance of deciduous trees. *Science*, 2021, no. 372(6539), pp. 280–283. <https://doi.org/10.1126/science.abf3903>

- [6] Dumitrașcu M., Kucsicsa G., Dumitrică C., Urșanu Popovici E. A., Vrînceanu A., Mitrică B., Mocanu I., Șerban P.R. Estimation of future changes in aboveground forest carbon stock in Romania. A prediction based on forest-cover pattern scenario. *Forests*, 2020, no. 11(9), p. 914. <https://doi.org/10.3390/f11090914>
- [7] Zhu W., Sang Y.L., Zhu Q., Duan B., Wang Y. Morphology and longevity of different-order fine roots in poplar (*Populus × euramericana*) plantations with contrasting forest productivities. *Canadian J. of Forest Research*, 2018, no. 48(6), pp. 611–620. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2017-0296>
- [8] Zhu Y., Feng Z., Lu J., Liu J. Estimation of forest biomass in Beijing (China) using multisource remote sensing and forest inventory data. *Forests*, 2020, no. 11(2), pp. 163. <https://doi.org/10.3390/f11020163/>
- [9] Potapenko A.M., Lazareva M.S., Storozhishina K.M. *Vosstanovlenie shirokolistvennykh lesov, sozdannykh v poryadke rekonstruktsii malotsennykh lesnykh nasazhdeniy lesokul'turnym metodom* [Restoration of broad-leaved forests, created in the order of reconstruction of low-value forest plantations, by silvicultural method]. *Trudy BGTU. Ser. 1*, 2020, no 1. pp. 69–74.
- [10] Urbanization, Biodiversity and Ecosystem Services: Challenges and Opportunities. Springer Dordrecht: Heidelberg-New-York-London, 2013, 754 p. DOI: 10.1007/978-94-007-7088-1_10
- [11] Wang F., Xiong Z., Dai X., Li Y., Wang, L. The response of the species diversity pattern of *Populus* to climate change in China. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2028, p. 116. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102858>
- [12] Zhou B., Kang Y., Leng J., Xu Q. Genome-wide analysis of the miRNA–mRNAs network involved in cold tolerance in, 2019. <https://doi.org/10.3390/genes10060430>
- [13] Luganskiy N.A., Zalesov S.V., Shchavrovskiy V.A. *Povyshenie produktivnosti lesov* [Increasing forest productivity]. Ekaterinburg: UGLTU, 1995, 297 p.
- [14] Moiseev N.A. *Ekonomika lesnogo khozyaystva* [Economics of forestry]. Moscow: MGUL, 2006, 384 p.
- [15] Nazarenko I.N. *Ekonomicheskaya organizatsiya vosproizvodstva lesnykh resursov* [Economic organisation of forest resources reproduction]. *Vestnik Altayskoy akademii ekonomiki i prava* [Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law], 2019, no. 4–1, pp. 113–117.
- [16] Petrov A.P., Il'in V.A., Nikolaeva G.N. *Ekonomika lesnogo khozyaystva* [Economics of forestry]. Moscow: Ekologiya, 1993, p. 20.
- [17] Pirs P.Kh. *Vvedenie v lesnyuyu ekonomiku* [Introduction to forest economics]. Moscow: Ekologiya, 1992, 224 p.
- [18] Tsarev A.P., Plugatar' Yu.V., Tsareva R.P. *Selektsiya i sortoispytanie topoley* [Poplar selection and variety testing]. Simferopol': ARIAL, 2019, p. 252.
- [19] Petrova G.A., Kalashnikova E.A., Mukhametshina A.R. *Analiz rosta osiny (Populus tremula L.), poluchennoy metodom in vitro v usloviyakh Respubliki Tatarstan* [Growth analysis of aspen (*Populus tremula* L.) produced by *in vitro* method in Republic of Tatarstan]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 5, pp. 15–22. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-5-15-22
- [20] Bagaev S.S. *Ob ostavlenii na kornyu fautnoy osiny pri rubkakh smeshannykh lesnykh nasazhdeniy* [On leaving standing aspen during felling of mixed forest stands]. *Tr. SPb. NIILKh* [Proceedings of the St. Petersburg Research Institute of Forestry], 2013, no. 1, pp. 11–18.
- [21] Blonskaya L., Sultanova R., Muftakhova S., Martynova M., Konashova S., Sabirzyanov I., Timer'yanov A., Khanova E., Ishbirdina L., Odintsov G. *Biologicheskie pokazateli topolya bashkirskogo Lombardiya (Populus nigra L. × Populus nigra var. italica Du Roi) v gorodskikh landshaftakh* [Biological indicators of Bashkir poplar Lombardia spp]. *Bolgarskiy zhurnal sel'skokhozyaystvennoy nauki* [Bulgarian Journal of Agricultural Science], 2019, no. 25 (S2), pp. 30–36.
- [22] Kim T.L., Chung H., Veerappan K., Lee W.Y., Park D., Lim H. Physiological and transcriptome responses to elevated CO₂ concentration in *Populus*. *Forests*, 2021, no. 12(8), p. 980. <https://doi.org/10.3390/f12080980>
- [23] Yu X., Lu B., Dong Y., Li, Y., Yang M. Cloning and functional identification of PeWRKY41 from *Populus × euramericana* pp. *Industrial Crops and Products*, 2022, no. 175, p. 114. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114279>
- [24] Tullus A., Rytter L., Tullus T., Weih M., Tullus H. Short-rotation forestry with hybrid aspen (*Populus tremula* L. × *P. tremuloides* Michx.) in Northern Europe. *Scandinavian J. of Forest Research*, 2012, no. 27(1), pp. 10–29. <https://doi.org/10.1080/02827581.2011.628949>
- [25] Bogdanov P.L. *Topolya i ikh kul'tura* [Poplars and their culture]. Moskva: Lesnaya promyshlennost', 1965, p. 104.
- [26] *Lesokhozyaystvennyy reglament Avzyanskogo lesnichestva Respubliki Bashkortostan. 2018 god. Chast' I* [Forest management regulations of Avzyanskoye lesnichestvo of the Republic of Bashkortostan. 2018. Part 1], 2018, 46 p.
- [27] Mukatanov A.Kh. *Lesnye pochvy Bashkortostana* [Forest soils of Bashkortostan]. Ufa: Gilem, 2002, 263 p.
- [28] Sarsekova D.N. *Vyrashchivanie plantatsionnykh topolevykh kul'tur na yugo-vostoke Respubliki Kazakhstan* [Plantation poplar cultivation in the south-east of the Republic of Kazakhstan], 2009, no. 2 (32), pp. 45–48.
- [29] Hemmati S., Gatmiri B., Cui Y.J., Vincent M. Validation d'un modèle d'extraction d'you par des racines d'arbre implanté dans θ-stoc // *Comptes Rendus du XVII éme Congrès international de mécanique des sols et d'ingénierie géotechnique*. Alexandrie, Egipte, 5–9 October, 2009. Alexandrie, 2009, pp. 890–915.
- [30] Klyuchnikov Yu.V. *Posadka i vyrashchivanie zashchitnykh lesnykh polos* [Planting and cultivation of protective forest belts], Voronezh, 1949, 59 p.
- [31] Vavin V.S., Rymar' V.T., Akhtyamov A.G. *Sozdanie dolgovechnykh lesnykh nasazhdeniy v usloviyakh yugo-vostoka TsChP* [Establishment of long-lived forest plantations in the conditions of the South-East of the CDC], Voronezh: GNU NIISKh TsChP im. V.V. Dokuchaeva, 2007, 246 p.
- [32] Tsarev A.P. *Rekomendatsii po vyrashchivaniyu nasazhdeniy topolya v yugo-vostochnoy chasti evropeyskoy territorii RSFSR* [Recommendations on growing poplar plantations in the south-eastern part of the European territory of the RSFSR.]. Voronezh: TsNIILGiS (VNPO «Soyuzlesselektsiya»), 1986, 37 p.

- [33] Tsarev A.P., Pogiba S.P., Laur N.V. pod obshch. red. A.P. Tsareva. *Selektsiya lesnykh i dekorativnykh drevesnykh rasteniy* [Selection of forest and ornamental woody plants]. Moscow: MGUL, 2014, 552 p.
- [34] Kleyn R.M., Kleyn D.T. *Metody issledovaniya rasteniy* [Methods of plant research]. Kolos: Moscow, 1974, pp. 46–58.
- [35] Low J.E., Åslund M.L.W., Rutter A., Zeeb B.A. Effect of pruning and nodal adventitious roots on the uptake of polychlorinated biphenyls by *Cucurbita pepo* grown under field conditions. *Environmental Pollution*, 2011, no. 159(3), pp. 769–775. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.11.015>
- [36] Bellamine J., Penel C., Greppin H., Gaspar T. Confirmation of the role of auxin and calcium in the late phases of adventitious root formation. *Plant Growth Regulation*, 1998, no. 26, pp. 191–194. <https://doi.org/10.1023/A:1006182801823>
- [37] Singh B., Gill R.E.S. Carbon uptake and nutrient export by some tree species in an agroforestry system in Punjab, India. *Grassland Management and Agroforestry*, 2014, no. 35(1), pp. 107–114.
- [38] Shumakov B.B., Kireycheva L.V. *Ekologicheskie aspekty melioratsii* [Ecological aspects of land reclamation]. *Vestnik Rossiyskoy akademii sel'skokhozyaystvennykh nauk*, 1994, no. 4., pp. 46–51.
- [39] Bogdanov P.L. *Dendrologiya. M.: Lesnaya promyshlennost'* [Forestry industry], 1974, 240 p.
- [40] Primak R. *Osnovy sokhraneniya bioraznoobraziya* [Fundamentals of biodiversity conservation]. Moscow: UNTs DO MGU, 2002, 256 p.

Authors' information

Shamsutdinova Aliya Ruslanovna✉ — pg. of the Bashkir State Agrarian University, shamsutdinova.aliya2015@yandex.ru

Sultanova Rida Razyabovna — Dr. Sci. (Agriculture), Professor of the Bashkir State Agrarian University, vestnik-bsau@mail.ru

Mustafin Radik Flusovich — Dr. Sci. (Agriculture) Professor of the Bashkir State Agrarian University, mustafin-1976@mail.ru

Received 16.02.2024.

Approved after review 20.09.2024.

Accepted for publication 05.02.2025.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

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

The authors declare that there is no conflict of interest

МОЛЕКУЛЯРНО-ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОПУЛЯЦИЙ *QUERCUS ROBUR* L. НА ОСНОВАНИИ ПОЛИМОРФИЗМА ISSR- И SSR-МАРКЕРОВ

А.Ф. Рябуха✉, П.А. Кузьмин

ФГБНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук» (ФНЦ агроэкологии РАН), Россия, 400062, г. Волгоград, пр. Университетский, д. 97

ryabuha-af@vfanс.ru

Проведен молекулярно-генетический анализ двух популяций *Quercus robur* L из Волгоградской области методами ISSR- и SSR-анализа (первая популяция из дендрологических насаждений ФНЦ агроэкологии РАН, г. Волгоград, вторая популяция из Нижневолжской опытной станции по селекции древесных пород; г. Камышин). Установлена наибольшая эффективность 9 из 18 протестированных ISSR-праймеров для анализа полиморфизма внутри популяций и между ними. Число локусов в спектре составило от 4 до 10 в зависимости от праймера. Наибольшее число локусов в спектре ($n = 10$) продуцировал праймер UBC835, наибольшая полиморфность (50...57 %) установлена с помощью праймеров UBC815, UBC834, UBC835, UBC836 и UBC840. Определены основные параметры генетического разнообразия популяций. Установлено, что все показатели были несколько выше у первой популяции ($n_a = 1,75 \pm 0,44$, $n_e = 1,44 \pm 0,38$, $H_E = 0,25 \pm 0,19$). В первой популяции полиморфизм был выше на 10 %, то есть вторая популяция содержит генетически более гомогенные деревья. В спектре на электрофореграмме, полученной с праймерами UBC811 и UBC834, выявлены уникальные фрагменты ДНК, характеризующие изменчивость внутри вида, которые могут быть использованы в дальнейшей селекционной работе. Показано, что для оценки полиморфизма данных популяций *Quercus robur* L использование SSR-праймеров менее эффективно в сравнении с ISSR-праймерами. Однако исследованные микросателлитные праймеры видоспецифичны, что позволяет использовать их, например, при генетической паспортизации вида.

Ключевые слова: дуб черешчатый, полиморфизм ДНК, молекулярные маркеры

Ссылка для цитирования: Рябуха А.Ф., Кузьмин П.А. Молекулярно-генетический анализ популяций *Quercus robur* L. на основании полиморфизма ISSR- и SSR-маркеров // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 2. С. 42–54. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-2-42-54

Дуб черешчатый (*Quercus robur* L) относится к семейству *Fagaceae*. Род *Quercus* — наиболее многочисленный в семействе *Fagaceae*, представлен приблизительно 600 видами и разновидностями. Дуб черешчатый — одна из самых ценных древесных пород, имеющих очень важное хозяйственное и медицинское значение [1].

Дуб широко используется для создания защитных и противоэрозионных лесных полос, в том числе в засушливых районах. В Волгоградской области накоплен многолетний опыт изучения различных видов и форм дуба по показателям засухоустойчивости, солеустойчивости, устойчивости к патогенам, что является основными направлениями его селекционного отбора для защитного лесоразведения [2, 3]. Наибольшее распространение в защитных лесополосах юго-востока европейской территории России получил дуб черешчатый и его

пирамидальная форма в связи с его высокой кислородной продуктивностью, засухоустойчивостью и солеустойчивостью [4, 5].

В условиях изменения климата, особенно в южных регионах России, наблюдается усыхание дубрав, что негативно может сказаться на генетической структуре его популяций. Первым этапом в работе по сохранению биологического и генетического разнообразия может стать оценка популяционной структуры и характера генетической изменчивости определенных экотипов дуба черешчатого в целях выявления наиболее продуктивных и устойчивых популяций. Далее для сохранения и воспроизводства видов, в том числе для отбора генотипов с ценными признаками помимо известных и давно применяющихся методов лесной селекции, возможно применение маркер-ассоциированной селекции (marker assisted selection, MAS) [6].

Фенотипические, биохимические, белковые (ферментные) маркеры давно используются при изучении различных аспектов, связанных

с жизнедеятельностью растений [10, 11]. Однако наиболее широко стали использовать молекулярно-генетический анализ с применением молекулярных маркеров, что позволяет идентифицировать генотипы, исследовать таксономию, филогенетику, осуществлять штрихкодирование [12–14]. Для оценки внутривидового полиморфизма в настоящее время наиболее широко используются межмикросателлитные (ISSR) и микросателлитные (SSR) праймеры [15–17].

С использованием 12 SSR-маркеров оценены генетическое разнообразие и генетическая структура семи популяций дуба черешчатого на Балканском полуострове. Установлено высокое генетическое разнообразие в изученных популяциях, более выраженное на внутривидовом уровне, чем между различными популяциями. Полученные данные позволяют идентифицировать экотопы, устойчивые к стресс-факторам и прогнозировать по ним генотипы на внутривидовом уровне, а также разрабатывать меры по сохранению дубов в условиях изменения климата [18].

В работе [19] с использованием 10 SSR-маркеров провели оценку генетического разнообразия популяций дуба черешчатого из 11 регионов России, произрастающих в различных географических условиях. Наибольшее генетическое расстояние рассчитано между образцами из Пензенской области и Республики Адыгея. При анализе дендрограммы сходства популяций установлено, что дуб черешчатый обладает высоким уровнем популяционного генетического разнообразия и низкой степенью дивергенции в пределах вида в изученной части ареала.

Группой ученых Южного Федерального университета с использованием ISSR-маркеров были проведены исследования связи экологических условий произрастания 13 популяций дуба черешчатого Ростовской области с их генетической структурой. По результатам исследований выявлено, что наименьшим средним уровнем ожидаемой гетерозиготности обладает байрачный экотоп, средним — аренный, наибольшим — пойменный, полиморфизм варьирует от 4,8 до 52,6 % [20].

Молекулярно-генетический анализ 12 природных популяций дуба черешчатого в Боснии и Герцеговине, находящихся на грани исчезновения, позволил установить большую генетическую изменчивость и дать рекомендации по сохранению популяции путем репродукции [21].

Молекулярно-генетический анализ, кроме того, позволяет проводить правильное районирование семян, изучение географических культур дуба. На основании изучения генетического полиморфизма дуба черешчатого даются реко-

мендации подразделения дубрав Южного Урала на два лесосеменных района и использования местного семенного материала для сохранения дубрав Белебеевской возвышенности [22]. В работе [23] методом анализа хлоропластной ДНК исследована геногеография дуба черешчатого на территории Белоруссии, в результате выделено три гаплотипа, даны рекомендации по использованию географических культур дуба для разработки лесосеменного районирования.

Проведение молекулярно-генетического анализа необходимо также для изучения генофонда долгоживущих деревьев и поиска генов, связанных с высокой продолжительностью жизни, перспективой использования таких деревьев в селекции и семеноводстве. В работе [24] представлен молекулярно-генетический анализ шести образцов дуба черешчатого, произрастающих на территории Украины, возрастом от 200 до около 1000 лет по семи SSR-маркерам, и расчет генетических показателей, определен уровень полиморфизма.

Пополнить ассортимент пород, используемых при создании защитных насаждений в условиях сухой степи, можно методом межвидовой гибридизации. Оценка гибридизации дуба черешчатого и дуба скального была изучена в работе [25] методом молекулярно-генетического анализа и сделан вывод о том, что образовавшиеся в результате гибриды могут обладать большей устойчивостью к абиотическим и биотическим стрессам.

Таким образом, актуальным представляется выявление и использование информативных ДНК-маркеров, характеризующих полиморфизм последовательностей нуклеиновых кислот и позволяющих изучать популяции в целях характеристики их генетического разнообразия и выявления наиболее ценных генотипов дуба черешчатого с перспективой применения их в защитном лесоразведении.

Цель работы

Цель работы — молекулярно-генетический анализ популяций дуба черешчатого на южной границе его ареала на основании полиморфизма ISSR- и SSR-маркеров.

Материалы и методы

Были исследованы образцы дуба черешчатого из двух популяций, произрастающих в дендрологических насаждениях ФНЦ агроэкологии РАН (кад. № 34:34:000000:122),

г. Волгоград (популяция 1) и на Нижневолжской опытной станции по селекции древесных пород — филиала ФНЦ агроэкологии РАН (кад. № 34:36:000014:0178), г. Камышин (популяция 2). Популяции произрастают в сходных условиях: на каштановых почвах в засушливом климате. Все деревья были в хорошем жизненном состоянии. Исследования проводили по общепринятым методикам изучения лесных насаждений [26]. На исследуемых территориях были заложены регулярным способом пробные площади (ПП) не менее пяти в каждой популяции размером не менее 0,25 га [27, 28]. На каждой ПП был выполнен сплошной пересчет деревьев, определены диаметр ствола и высота всех деревьев [29]. Относительное жизненное состояние (ОЖС) древостоя было установлено по методике В.А. Алексеева [30].

При создании биоресурсных коллекций проводился отбор древесных видов по хозяйственно ценным признакам [31, 32], поэтому представлялось важным проведение идентификации ценных генотипов молекулярно-генетическими методами.

Геномную ДНК экстрагировали из образцов листьев массой 50 мг с помощью модифицированного метода, используя в качестве экстрагента бромид цетилтриметиламмоний (ЦТАБ) с 2 % β-меркаптоэтанолом с некоторыми модификациями [33–35]. Концентрацию выделенной ДНК и соотношения оптической плотности при разных длинах волн, характеризующих степень очистки образца от белков и полифенолов (A260/A280, A260/A230), определяли на спектрофотометре SpectrostarNano (BMG Labtech, Германия). Концентрацию ДНК доводили до 50 нг/мкл водой дистиллированной двойной очистки и хранили выделенный образец при температуре –20 °С для следующих экспериментов по амплификации. Далее был проведен молекулярно-генетический анализ образцов дуба черешчатого с ISSR- и SSR-праймерами, подобранными на основе литературных данных [36–38]. Основные параметры данных праймеров приведены в табл. 1, 2.

Амплификацию с использованием ISSR- и SSR-праймеров проводили с использованием набора qPCRMix-HS (кат. № PK145L) (ЗАО «Евроген», Россия) в соответствии с инструкциями производителя. Для амплификации геномной ДНК с помощью ISSR- и SSR-маркеров использовали программу Applied Biosystems QuantStudio 5 (Thermo Fisher Scientific, США) со следующими условиями амплификации: начальная денатурация при температуре 95 °С в течение 5 мин, затем 40 циклов, включающих в себя денатурацию при 95 °С за 30 с, отжиг — 30 с

Т а б л и ц а 1

Название ISSR-праймеров, их последовательность и температура отжига

Name of ISSR-primers, their sequence and annealing temperature

Название	Нуклеотидная последовательность '5–3'	Температура отжига праймера, T_m , °С
UBC807	(AG) ₈ T	50,0
UBC808	(AG) ₈ C	50,6
UBC811	(GA) ₈ C	54,2
UBC815	(CT) ₈ G	50,0
UBC818	(CA) ₈ G	53,0
UBC823	(TC) ₈ C	50,7
UBC826	(AC) ₈ C	54,7
UBC834	(AG) ₈ Y	51,5
UBC835	(AG) ₈ YC	54,0
UBC836	(AG) ₈ YA	51,5
UBC840	(GA) ₈ YT	51,5
UBC841	(GA) ₈ YC	54,0
UBC843	(CT) ₈ RA	51,5
UBC857	(AC) ₈ YG	54,0
UBC860	(TG) ₈ RA	51,5
UBC873	(GACA) ₄	50,0
UBC880	(GGAG) ₄	62,4
UBC890	VHV(GT) ₇	50,0

(температура отжига для различных праймеров — 55...62 °С), элонгация при температуре 72 °С в течение 30 с, финальная элонгация при температуре 72 °С в течение 10 мин.

Для разделения полученных ампликонов использовали электрофорез в 2%-м агарозном геле в трис-ацетатном буфере. Размер полос ДНК на геле рассчитывали с помощью ДНК-праймера Step50+ (Biolabmix, Россия). Визуализацию результатов электрофореза проводили в геледокументирующей системе (Invitrogen iBright, США) в проходящем ультрафиолетовом свете (УФ-свете) после связывания фрагментов ДНК с бромистым этидием.

Статистический анализ полученных данных проводили с использованием программы Microsoft Excel (версия 2010), Statistica 12.0 (StatSoft Inc., USA). Данные полимеразной цепной реакции (ПЦР) были получены на основе трехкратной амплификации каждого выбранного праймера с согласованными полосами. Было оценено аллельное разнообразие двух популяций, при этом локусы ПЦР на основе ISSR оценивались как присутствующие 1 или отсутствующие 0, каждый из которых рассматривался как независимый. Полученные

Т а б л и ц а 2

Название SSR-праймеров, их последовательность, температура отжига и ожидаемый размер ампликона

Name of SSR-primers, their sequence, annealing temperature and expected amplicon size

Название праймера	Нуклеотидная последовательность праймеров 5'-3'	Температура отжига праймера, T_m , °C	Ожидаемый размер ампликона, п. н.
QrZAG11	F:CCTTGAACCTCGAAGGTGTCCTT	62	238–267 [19]
	R:GTAGGTCAAAACCATTGGTTGACT		
QrZAG96	F:CCCAGTCACATCCACTACTGTCC	61	137–179 [19]
	R:GGTTGGGAAAAGGAGATCAGA		
QrZAG110	GGAGGCTTCCTTCAACCTACT	59	206–262 [19]
	GATCTCTTGTGTGCTGTATTT		
QrZAG39	CACCGCTGGAATTTAAAGGGA	61	103-139 [19]
	GACCTAAGCCAAAGTGTGGGC		

бинарные матрицы использовались для расчета характеристик связывания праймеров в программе POPGENE версии 1.31. Были рассчитаны показатели генетического разнообразия двух популяций *Q. Robur*: ожидаемая гетерозиготность, абсолютное число аллелей на локус, эффективное число аллелей на локус, индекс Шеннона [39, 40].

Результаты и обсуждение

В дендрологических насаждениях ФНЦ агроэкологии РАН относительное жизненное состояние древостоя характеризуется как удовлетворительное (90 %). Возраст древостоя 25...30 лет. Здоровые деревья составляют 79 %, ослабленные — 18,5 %, сильно ослабленные и отмирающие — 2,5 % особей. В данном насаждении *Q. Robur* составляет 80 % общего числа деревьев. Плотность посадок 595 шт./га. Сомкнутость крон 0,75...0,85. Средние таксационные показатели: $D_{1,3} = 18$ см, $H = 9$ м, $D_{\text{кроны}} = 6,5$ м (рис. 1, а).

В насаждениях Нижневолжской опытной станции по селекции древесных пород относительное жизненное состояние древостоя было оценено как удовлетворительное (90 %). Возраст древостоя 35...40 лет. Здоровые деревья составляют 80 %, ослабленные — 14 %, сильно ослабленные и отмирающие — 6 % особей. В данном насаждении *Q. Robur* составляет 50 % общего числа деревьев. Плотность посадок 510 шт./га. Сомкнутость крон 0,70...0,75. Средние таксационные показатели: $D_{1,3} = 20$ см, $H = 9,5$ м, $D_{\text{кроны}} = 8$ м (рис. 1, б).

Т а б л и ц а 3

Концентрации и спектральные соотношения (A260/A280, A260/A230) образцов ДНК дуба черешчатого (из двух популяций)

Concentrations and spectral ratios (A260/A280, A260/A230) of pedunculate oak DNA samples (from two populations)

Номер популяции	A260/A280	A260/A230	Концентрация, нг/мкл
1	1,94 ± 0,05	1,81 ± 0,28	76,9 ± 16,11
2	1,98 ± 0,05	1,99 ± 0,42	29,36 ± 9,98

Примечание. Представлены средние значения определений ($n = 10$) и их стандартные отклонения.

Измеренные концентрации и спектральные соотношения образцов ДНК (примеры из двух популяций) приведены в табл. 3.

В целях определения внутривидового генетического разнообразия *Q. Robur* было протестировано 18 ISSR-праймеров в каждой группе особей.

В результате проведенного тестирования было отобрано 9 ISSR-праймеров, отличающиеся высокой эффективностью амплификации большего количества фрагментов геномной ДНК (табл. 4).

Все использованные праймеры показали наличие полиморфизма у исследованных генотипов дуба. На основании анализа полученных электрофореграмм установлено, что число ISSR-фрагментов на общую проанализированную выборку варьировало от 4 (праймер UBC840) до 10 (праймер UBC835).



Рис. 1. Образцы *Q. Robur*, из двух популяций, произрастающих в насаждениях ФНЦ агроэкологии РАН: *a* — образец популяции 1 из дендрологических насаждений (Волгоград), координаты 48°37'55.550"N, 44°24'58.844"E; *б* — образец популяции 2 из Нижневолжской опытной станции по селекции древесных пород (Камышин), координаты 50°4'34.787"N, 45°22'23.022"E

Fig. 1. Samples of *Q. Robur*, from two populations growing in plantings of the Federal Research Center of Agroecology of the Russian Academy of Sciences: *a* — population sample 1 from the arboretum (Volgograd), positions 48°37'55.550"N, 44°24'58.844"E; *б* — population sample 2 from the Nizhnevolzhsky Experimental Station for Tree Breeding (Kamyshin), positions 50°4'34.787"N, 45°22'23.022"E

Длина фрагментов укладывалась в диапазон от 225 п. н. (праймер UBC834) до 1000 п. н. (праймеры UBC807, UBC835, UBC836).

Для большей детализации эффективности примененных ISSR-праймеров была проведена оценка частоты встречаемости по каждому локусу у двух популяций, полученных с помощью электрофореза ампликонов (табл. 5).

Каждый анализируемый локус ISSR-маркера формировал специфичный спектр продуктов ампликации у каждой особи *Q. Robur* в популяции (рис. 2). Для некоторых особей на электрофореграммах отмечены уникальные

фрагменты ДНК. Как видно из рис. 2, *б*, спектр продуктов ампликации с праймером UBC811 специфичен для особи 5, наблюдается уникальный фрагмент ДНК размером 700 п. н. Также для некоторых особей с праймером — UBC834 (рис. 2, *з*) выделяется фрагмент 650 п. н. (на соответствующих рисунках отмечены стрелками).

На основе полученных спектров ампликонов (см. рис. 2) были составлены бинарные матрицы для дальнейшей математической обработки в POPGENE в целях оценки генетического разнообразия в двух популяциях *Q. Robur*, произрастающих на разных территориях. Для изученных

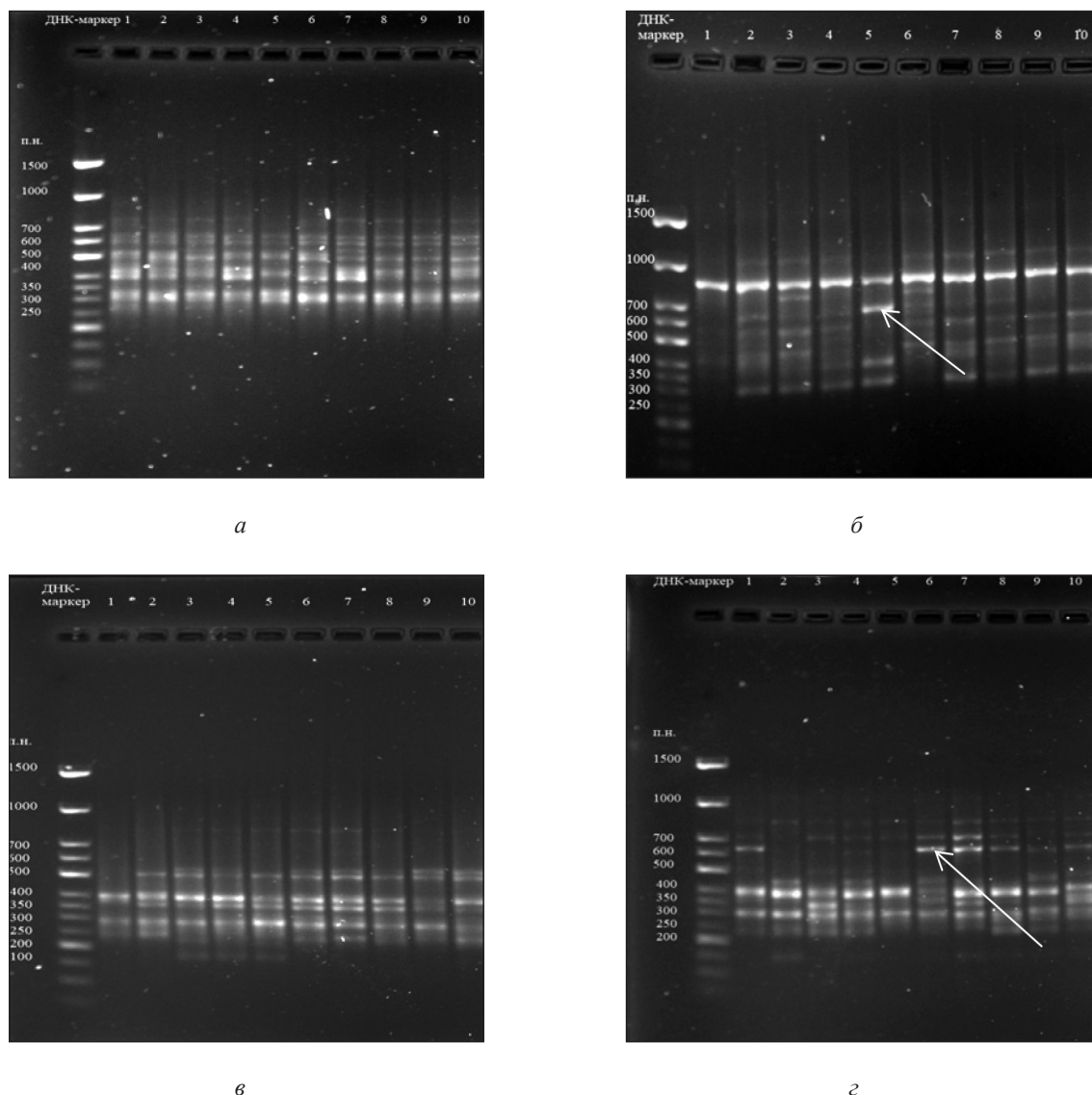


Рис. 2. Электрофореграммы продуктов амплификации *Q. Robur*, с ISSR-праймером: *a* — UBC807; *б* — UBC811; *в* — UBC841; *г* — UBC834; ДНК-маркер — Step50+ (Biolabmix); лунки 1–10 — образцы первой популяции

Fig. 2. Electropherograms of *Q. Robur* amplification products, with ISSR-primer: *a* — UBC807; *б* — UBC811; *в* — UBC841; *г* — UBC834; DNA marker — Step50+ (Biolabmix); wells 1–10 are samples of the first population

популяций *Q. robur* были рассчитаны основные показатели генетической изменчивости (табл. 6).

Основные показатели генетического разнообразия *Q. Robur* несколько выше в первой популяции, в том числе значение полиморфизма выше на 10 %.

Далее был проведен молекулярный анализ образцов ДНК дуба черешчатого с SSR-праймерами (рис. 3). Как видно из рис. 3, для двух популяций дуба черешчатого каждый из представленных локусов является полиморфным.

Для праймера QR-Zag11 наблюдается один аллель на локус для образцов № 1 и № 5 пер-

вой популяции, размер ампликона составляет 300 п. н., для образца № 4 первой популяции — 250 п. н., для образцов № 2 и № 3 второй популяции — 250 п. н., для всех остальных образцов наблюдали два аллеля размерами 250 и 300 п. н. Для праймера QR-Zag39 наблюдается один аллель размером 140 п. н., для образцов № 2 и № 4 первой популяции и образцов № 1, № 2, № 4 второй популяции и два аллеля размерами 140 и 170 п. н. для остальных образцов. Для праймера QR-Zag110 наблюдается один аллель, но разной длины размером 220...270 п. н. для разных образцов.

Т а б л и ц а 4

Окончание табл. 5

Анализ ISSR-спектров изученных популяций *Q. Robur*

Analysis of ISSR spectra of the studied populations of *Q. Robur*

Праймер	Номер популяции	Граница длин локусов спектра, п.н.	Число локусов в спектре	Число полиморфных локусов	Полиморфность, %
UBC807	1	300...1000	9	3	33,3
	2				
UBC811	1	275...850	8	3	37,5
	2				
UBC815	1	300...800	8	4	50,0
	2				
UBC826	1	300...900	7	2	28,5
	2				
UBC834	1	225...700	7	4	57,1
	2				
UBC835	1	250...1000	10	5	50,0
	2				
UBC836	1	350...1000	8	4	50,0
	2				
UBC840	1	250...550	4	2	50,0
	2				
UBC841	1	300...520	6	2	33,3
	2				

Т а б л и ц а 5

Частота ISSR-маркеров двух изученных популяций *Q. Robur*

Frequency of ISSR markers of the two studied populations of *Q. Robur*

Название праймера	Длина фрагментов (п. н.)	Частота встречаемости фрагмента в популяциях	
		Популяция 1	Популяция 2
UBC807	300	1,00	0,11
	400	0,50	0,22
	425	0,67	0
	500	0,22	0,22
	550	0,22	0
	600	1,00	0
	625	1,00	0
	900	0	0,11
	1000	0	0,22
	UBC811	275	0
400		0,89	0,44
450		1,00	0,56
500		0,89	0,56
550		1,00	0
600		0,22	0,44
700		0,11	0,33
850		0,11	1,00

Название праймера	Длина фрагментов (п. н.)	Частота встречаемости фрагмента в популяциях	
		Популяция 1	Популяция 2
UBC815	300	0,11	0
	350	0,33	0,22
	400	0,11	0,11
	425	0,33	0,56
	475	0,22	0
	600	0,89	0,33
	700	0,67	0,33
	800	0,78	0
UBC826	300	0,78	0,33
	400	0,11	0
	450	0,67	0,56
	500	0,67	0,56
	600	0,11	0,44
	800	0,22	0,44
UBC834	900	1,00	0,56
	225	0,44	0
	300	1,00	0,56
	325	0,22	0
	400	0,89	0,56
	450	0,22	0
	650	0,44	0
UBC835	700	0,22	0,11
	250	0,33	0,11
	300	0,67	0,78
	350	0,89	0,11
	400	0,44	0
	450	0	0,78
	500	0,33	0,22
	520	0,56	0
	800	0,22	0
	950	0,67	0
	1000	0	0,22
	UBC836	350	1,00
400		0,22	0,67
450		0,78	0,11
480		0,33	0
550		0,22	0
600		0,11	0
700		0	0,33
1000		0,89	0,44
UBC840	250	1,00	0,78
	350	0,78	0,33
	500	0,78	0,44
UBC841	550	0,78	0,44
	250	0,44	0,56
	280	1,00	0,56
	350	0,89	0,33
	400	0,89	0,33
	500	0,78	0,56
520	0,44	0	

Т а б л и ц а 6

Показатели генетического разнообразия двух популяций *Q. Robur*Indicators of the genetic diversity of two populations of *Q. Robur*

Номер популяции	Абсолютное число аллелей на локус, n_a	Эффективное число аллелей на локус, n_e	Ожидаемая гетерозиготность, H_E	Индекс Шеннона, I	Полиморфизм, %
1	1,75 ± 0,44	1,44 ± 0,38	0,25 ± 0,19	0,38 ± 0,27	74,63
2	1,67 ± 0,47	1,36 ± 0,35	0,22 ± 0,19	0,34 ± 0,27	67,16

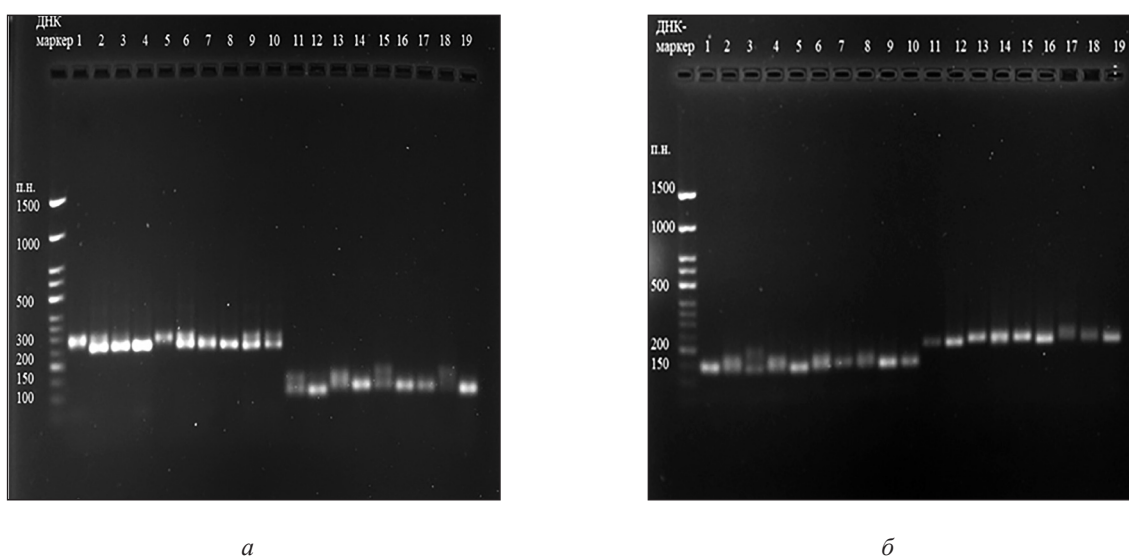


Рис. 3. Электрофореграммы продуктов амплификации *Q. Robur* с SSR-праймерами: *a* — QR-Zag11 (1–10 лунки), QR-Zag39 (11–19 лунки); *б* — QR-Zag96 (1–10 лунки), QR-Zag110 (11–19 лунки); ДНК-маркер — Step50+ (Biolabmix); 1–5, 11–15 лунки — образцы 1–5 первой популяции; 6–10 лунки — образцы 1–5 второй популяции, 16–19 лунки — образцы 1–4 второй популяции

Fig. 3. Electropherograms of *Q. Robur* amplification products with SSR-primers: *a* — QR-Zag11 (1–10 wells), QR-Zag39 (11–19 wells); *б* — QR-Zag96 (1–10 wells), QR-Zag110 (11–19 wells); DNA marker — Step50+ (Biolabmix); holes 1–5, 11–15 are samples 1–5 of the first population; holes 6–10 are samples 1–5 of the second population, holes 16–19 are samples 1–4 of the second population

Для праймера QR-Zag96 наблюдается от одного до двух аллелей на локус. Один аллель размером 150 п. н. для образцов № 1 и № 5 первой популяции и для образцов № 2, № 4, № 5 второй популяции, два аллеля размерами 150 и 170 п. н. для образцов № 2 и № 4 первой популяции и для образцов № 1, № 3 второй популяции. Два аллеля размером 150 и 200 п. н. отмечено для образца № 3 первой популяции (см. рис. 3).

Спектр продуктов амплификации свидетельствует о том, что для оценки полиморфизма данных популяций SSR-праймеры показали меньшую эффективность, чем ISSR-праймеры.

Выводы

Установлена эффективность для анализа полиморфизма ДНК *Q. Robur* девяти из 18 про-

тестированных ISSR-праймеров. На основании анализа полученных электрофореграмм установлено, что число ISSR-фрагментов на общую проанализированную выборку варьировало от 4 (праймер UBC840) до 10 (праймер UBC835). Длина фрагментов укладывалась в диапазон от 225 п. н. (праймер UBC834) до 1000 п. н. (праймеры UBC807, UBC835, UBC836), наибольшая полиморфность (50...57 %) установлена с помощью праймеров UBC815, UBC834, UBC835, UBC836 и UBC840.

По выборкам дуба черешчатого из Волгоградской области показана изменчивость показателей «число аллелей на локус» и «ожидаемая гетерозиготность», а также уникальные локусы, характеризующие изменчивость внутри вида на границе ареала, что может быть использовано в дальнейшей селекционной работе.

Установлено, что все показатели генетического разнообразия были несколько выше у первой популяции ($n_a = 1,75 \pm 0,44$, $n_e = 1,44 \pm 0,38$, $H_E = 0,25 \pm 0,19$). В первой популяции полиморфизм был выше на 10 %, т. е. вторая популяция содержит генетически более гомогенные деревья.

Видоспецифичность микросателлитных праймеров позволяет использовать их, например, при генетической паспортизации вида. Межмикросателлитные праймеры характеризуют полиморфизм внутри популяций и между ними.

Выявление популяций дуба черешчатого, обладающих высоким полиморфизмом межмикросателлитных локусов, является крайне важным направлением исследовательских работ в целях увеличения количества популяций дуба для его сохранения и воспроизводства, отбора ценных генотипов, устойчивых к различным типам стресса.


Работа выполнена по теме Государственного задания «Поиск селекционно-ценного генетического материала для создания новых генотипов древесно-кустарниковых пород методами молекулярной селекции» (№ FNFE-2022-0009).

Список литературы

- [1] Рябов Н.А., Рыжов В.М., Куркин В.А., Колпакова С.Д., Жестков А.В., Лямин А.В. Антимикробная активность водно-спиртовых извлечений листьев и почек дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) // Фармация и фармакология, 2021. Т. 9. № 2 С. 104–113. DOI: 10.19163/2307-9266-2021-9-2-104-113
- [2] Морозова Е.В., Иозус А.П. Основные результаты селекции пирамидальных форм дуба черешчатого в условиях сухой степи Нижнего Поволжья // Современные проблемы науки и образования, 2015. № 2–2. С. 816–821.
- [3] Скуратов И.В., Крюкова Е.А. Оценка устойчивости видов, гибридов и форм рода *Quercus* к эколого-патологическим факторам для защитного лесоразведения // Современные проблемы науки и образования, 2013. № 1. С. 418–425.
- [4] Крючков С.Н., Магтис Г.Я. Лесоразведение в засушливых условиях. Волгоград: Изд-во ВНИАЛМИ, 2014. 300 с.
- [5] Тараканов В.В., Паленова М.М., Паркина О.В., Роговцев Р.В., Третьякова Р.А. Лесная селекция в России: достижения, проблемы, приоритеты (обзор) // Лесохозяйственная информация, 2021. № 1. С. 100–143.
- [6] Чесноков Ю.В., Косолапов В.М. Генетические ресурсы растений и ускорение селекционного процесса. М.: Угрешская типография, 2016. 172 с.
- [7] Молекулярно-генетические и биохимические методы в современной биологии растений / под ред. В.В. Кузнецова, В.В. Кузнецова, Г.А. Романова. М.: БИНОМ, 2012. 487 с.
- [8] Карпеченко К.А., Карпеченко И.Ю., Землянухина О.А., Вепринцев В.Н., Кондратьева А.М., Карпеченко Н.А., Калаев В.Н. Изучение метаболизма плюсовых деревьев дуба черешчатого (*Quercus Robur* L.) // Фундаментальные исследования, 2013. № 1. С. 287–291.
- [9] Чеботарев П.А., Чеботарева В.В., Стороженко В.Г. Формовое разнообразие желудей дуба в дубравах лесостепи // Вестник БГАУ, 2020. № 4. С. 67–72.
- [10] Younis A., Ramzan F., Ramzan Y., Zulficar F., Ahsan M., Lim K.B. Molecular Markers Improve Abiotic Stress Tolerance in Crops: A Review // Plants, 2020, no. 9(10), pp. 1–16. <https://doi.org/10.3390/plants9101374>
- [11] Nadeem M.A., Nawaz M.A., Shahid M.Q., Doğan Y., Comertpay G., Yıldız M., Hatipoğlu R., Ahmad F., Alsaleh A., Labhane N., Özkan H., Chung G., Baloch F.S. DNA molecular markers in plant breeding: current status and recent advancements in genomic selection and genome editing // Biotechnology, Biotechnological Equipment, 2018, v. 32, pp. 261–285. DOI: 10.1080/13102818.2017.1400401
- [12] Боронникова С.В. Молекулярно-генетический анализ и оценка состояния генофондов ресурсных видов растений Пермского края. Пермь: Изд-во ПГНИУ, 2013. 223 с.
- [13] Семерикова С.А., Исаков И.Ю., Семериков В.Л. Изменчивость хлоропластной ДНК и филогеография дуба черешчатого *Quercus robur* L. в восточной части ареала // Генетика, 2021. 57(1). С. 56–71. DOI: 10.31857/S0016675821010136
- [14] Deguilloux M.-F., Dumolin-Lapegue S., Gielly L., Grivet D., Petit R.J. A set of primers for the amplification of chloroplast microsatellites in *Quercus* // Molecular Ecology Notes, 2003 no. 3, pp. 24–27. DOI: 10.1046/j.1471-8286.2003.00339.x
- [15] Пришнинская Я.В., Красильников В.П., Боронникова С.В. Молекулярно-генетическая идентификация популяций *Pinus Sylvestris* L. на востоке русской равнины на основании полиморфизма ISSR-маркеров // Вестник Пермского университета, 2016. Вып. 2. С. 171–175.
- [16] Камнев А.М., Антонова О.Ю., Дунаева С.Е., Гавриленко Т.А., Чухина И.Г. Молекулярные маркеры в исследованиях генетического разнообразия представителей рода *Rubus* L. и перспективы их применения в селекции // Вавиловский журнал генетики и селекции, 2020. Т. 24. № 1. С. 20–30. DOI 10.18699/VJ20.591.
- [17] Kloch M., Hawliczek-Strulak A.A., Swrecka-Belniak A.A. Molecular markers in forest management and tree breeding: a review // Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW Forestry and Wood Technology, 2015, no. 92, pp. 193–199.
- [18] Kesic L., Cseke K., Orlovic S., Stojanović D.B., Kostić S., Benke A., Borovics A., Stojnić S., Avramidou E.V. Genetic Diversity and Differentiation of Pedunculate Oak (*Quercus robur* L.). Population at the Southern Margin of its Distribution Range – Implications for Conservation // Diversity, 2021, v. 13, pp. 371–385. <https://doi.org/10.3390/d13080371>
- [19] Кулаков Е.Е., Воробьева Е.А., Сиволапов В.А., Карпеченко Н.А. Оценка полиморфизма дуба черешчатого (*Quercus robur*) с помощью SSR-анализа // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 4. С. 44–51. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-4-44-51

- [20] Чохели В.А., Каган Д.И., Вардун Т.В., Козловский Б.Л., Серета М.М., Капралова О.А., Дмитриев П.А., Падутов В.Е. Эколого-генетическая дифференциация популяций *Quercus robur* L. на территории Ростовской области с применением ISSR-маркеров // *Turczaninowia*, 2018, 21 (4). С. 161–167. DOI: 10.14258/turczaninowia.21.4.16
- [21] Ballian D, Belletti P, Ferrazzini D, Bogunic F, Kajba D. Genetic variability of Pedunculate Oak (*Quercus robur* L.) in Bosnia and Herzegovina // *Periodicum Biologotum*, 2010, v. 112, pp. 353–362.
- [22] Янбаев Р.Ю., Габитова А.А., Султанова Р.Р., Боронникова С.В., Янбаев Ю.А. ISSR-анализ полиморфизма ДНК дуба черешчатого: аргументы в пользу использования для лесовосстановления семян местных насаждений // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*, 2017. № 1 (63). С. 220–222.
- [23] Ковалевич О.А., Каган Д.И. Геногеография дуба черешчатого на основе молекулярного анализа хлоропластной ДНК // *Труды БГТУ. Серия I. Лесное хозяйство*, 2010. Вып. XVIII. С. 281–283.
- [24] Bilous S., Prysiazniuk L., Chernii S., Melnyk S., Marchuk Y., Likhanov A. Genetic characterisation of centuries-old oak and linden trees using SSR markers // *Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry*, 2022, v. 64 (1), pp. 58–68. DOI: 10.2478/ffp-2022-0006
- [25] Падутов В.Е. Процессы гибридизации дуба черешчатого и дуба скального по результатам молекулярно-генетического анализа // *Труды БГТУ*, 2021. № 1(2). С. 93–102. DOI: <https://doi.org/10.52065/2519-402X-2021-246-12-93-102>
- [26] Баранов Н.И., Курбатский Н.П. Таксация лесосек. М.; Л.: Гослесбуиздат, 1951. 120 с.
- [27] Смирнова О.В., Заугольнова Л.Б., Ханина Л.Г., Боровский М.В., Торопова Н.А. Популяционные и фитоценоотические методы анализа биоразнообразия растительного покрова // *Сохранение и восстановление биоразнообразия*. М.: Изд-во НУМЦ, 2002. С. 145–194.
- [28] Артаев О.Н., Башмаков Д.И., Безина О.В. Методы полевых экологических исследований: учеб. пособие / под ред. А.Б. Ручина. Саранск: Изд-во Мордовского ун-та, 2014. 412 с.
- [29] Мартынов А.Н., Мельников Е.С., Ковязин В.Ф., Аникин А.С. Основы лесного хозяйства и таксация леса. СПб.: Лань, 2022. 432 с.
- [30] Алексеев В.А., Чертов О.Г., Сергейчик С.А. Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение / под ред. В.А. Алексеева. Л.: Наука, 1990. 200 с.
- [31] Семенютина А.В., Хужахметова А.Ш., Долгих А.А., Семенютина В.А., Цой М.В. Анализ биоресурсных коллекций по климатическим ритмам и фенологическим процессам // *Успехи современного естествознания*, 2011. № 2. С. 39–45.
- [32] Семенютина А.В. Дендрофлора лесомелиоративных комплексов / под ред. И.П. Свинцова. Волгоград: Изд-во ВНИАЛМИ, 2013. 266 с.
- [33] Попова А.А., Гродецкая Т.А., Молчанов В.В., Евлаков Р.М. Подбор и оптимизация методов экстракции ДНК из различного растительного материала // *Вестник Поволжского государственного технологического университета*, 2022. № 1(53). С. 69–76.
- [34] Кулаков Е.Е., Сиволапов В.А., Воробьева Е.А., Сиволапов А.И. Генетическая изменчивость лиственницы Сукачева (*Larix sukaczewii* Djil.) в географических культурах под Воронежем // *Лесотехнический журнал*, 2018. № 1 (29). С. 35–42. DOI: 10.12737/article_5ab0dfbc03a703.71494463
- [35] Рябуха А.Ф., Кузьмин П.А. Подбор и оптимизация методов экстракции ДНК из листьев гледичии трехлопчатой (*Gleditsia triacanthos* L.) // *Аграрный вестник Урала*, 2024. Т. 24. № 02. С. 207–217.
- [36] Chokheli V., Kozlovsky B., Sereda M., Lysenko V., Fesenko I., Varduny T., Kapralova O., Bondarenko E. Preliminary comparative analysis of phenological varieties of *Quercus robur* by ISSR-markers // *J. of Botany*, 2016, t. 2016, p. 7910451. DOI:10.1155/2016/7910451
- [37] Lepais O., Leger V., Gerber S. High throughput microsatellite genotyping in oak species // *Silvae Genetica*, 2006, v. 55, pp. 238–240.
- [38] Ржевский С.Г., Кондратьева А.М. Использование ISSR и SSR-маркеров для генотипирования некоторых видов клена (*Acer*) // *Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства*, 2022. № 3. С. 16–24.
- [39] Nei M. Genetic distance between populations // *American Naturalist*, 1972, v. 106, pp. 283–292.
- [40] Leberg P.L. Estimating Allelic Richness: Effects of Sample Size and Bottlenecks // *Molecular Ecology*, 2002, v. 11, pp. 2445–2449. <https://doi.org/10.1046/j.1365-294X.2002.01612.x>

Сведения об авторах

Рябуха Анна Федоровна  — канд. фарм. наук, вед. науч. сотр. лаборатории молекулярной селекции, ФГБНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук» (ФНЦ агроэкологии РАН), ryabuha-af@vfanc.ru

Кузьмин Петр Анатольевич — канд. с.-х. наук, вед. науч. сотр., и. о. зав. лаб. молекулярной селекции, ФГБНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук» (ФНЦ агроэкологии РАН), kuzmin-p@vfanc.ru

Поступила в редакцию 12.03.2024.

Одобрено после рецензирования 02.07.2024.

Принята к публикации 04.02.2025.

MOLECULAR GENETIC ANALYSIS OF *QUERCUS ROBUR* L POPULATIONS BASED ON POLYMORPHISM OF ISSR- AND SSR-MARKERS

A.F. Ryabukha✉, P.A. Kuz'min

Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, 97, Universitetskiiy av., 400062, Volgograd, Russia

ryabuha-af@vfanc.ru

A molecular genetic analysis of two populations of *Quercus robur* L from the Volgograd region was carried out using ISSR and SSR analysis methods (the first population from the arboretum plantations of the Federal Research Center for Agroecology of the Russian Academy of Sciences, Volgograd, the second population from the Nizhnevolzhsky Experimental Station for tree breeding; Kamyshin). Nine of the 18 ISSR primers tested were found to be most effective for analyzing polymorphism within and between populations. The number of loci in the spectrum ranged from 4 to 10, depending on the primer. The UBC835 primer produced the largest number of loci in the spectrum ($n = 10$), and the greatest polymorphism (50...57 %) was found using UBC815, UBC834, UBC835, UBC836, and UBC840 primers. The main parameters of the genetic diversity of populations have been determined. It was found that all indicators were slightly higher in the first population ($n_a = 1,75 \pm 0,44$, $n_e = 1,44 \pm 0,38$, $H_E = 0,25 \pm 0,19$). In the first population, polymorphism was higher by 10 %, meaning that the second population contains genetically more homogeneous trees. The electrophoregram obtained with UBC811 and UBC834 primers revealed unique DNA fragments characterizing variability within the species, which can be used in further breeding work. It has been shown that the use of SSR primers is less effective in assessing the polymorphism of these populations of *Quercus robur* L in comparison with ISSR primers. However, the microsatellite primers studied are species-specific, which makes it possible to use them, for example, in the genetic certification of a species.

Keywords: oak petiolate, DNA polymorphism, molecular markers

Suggested citation: Ryabukha A.F., Kuz'min P.A. *Molekulyarno-geneticheskiy analiz populyatsiy Quercus robur L. na osnovanii polimorfizma ISSR- i SSR-markerov* [Molecular genetic analysis of *Quercus robur* L populations based on polymorphism of ISSR- and SSR-markers]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 2, pp. 42–54. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-2-42-54

References


- [1] Ryabov N.A., Ryzhov V.M., Kurkin V.A., Kolpakova S.D., Zhestkov A.V., Lyamin A.V. *Antimikrobnaya aktivnost' vodno-spirtovykh izvlecheniy list'ev i pochk duba chereshchatogo (Quercus robur L)* [Antimicrobial activity of water-alcohol extracts of leaves and buds of oak petiolate (*Quercus robur* L)]. *Farmatsiya i farmakologiya* [Pharmacy and Pharmacology], 2021. v. 9, no. 2 pp. 104–113. DOI: 10.19163/2307-9266-2021-9-2-104-113.
- [2] Morozova E.V., Iozus A.P. *Osnovnye rezul'taty seleksii piramidal'nykh form duba chereshchatogo v usloviyakh sukhoy stepi Nizhnego Povolzh'ya* [The main results of the selection of pyramidal forms of pedunculate oak in the conditions of the dry steppe of the Lower Volga region]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2015, no. 2–2, pp. 816–821
- [3] Skuratov I.V., Kryukova E.A. *Otsenka ustoychivosti vidov, gibridov i form roda Quercus k ekologo-patologicheskim faktoram dlya zashchitnogo lesorazvedeniya* [Assessment of the resistance of species, hybrids and forms of the genus *Quercus* to ecological and pathological factors for protective afforestation]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2013, no 1, pp. 418–425.
- [4] Kryuchkov S.N., Mattis G.Ya. *Lesorazvedenie v zasushlivykh usloviyakh* [Afforestation in arid conditions]. Volgograd: VNIALMI, 2014, 300 p.
- [5] Tarakanov V.V., Palenova M.M., Parkina O.V., Rogovtsev R.V., Tret'yakova R.A. *Lesnaya selektsiya v Rossii: dostizheniya, problemy, priority (obzor)* [Forest breeding in Russia: achievements, problems, priorities (overview)]. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information], 2021, no 1, pp. 100–143.
- [6] Chesnokov Yu.V., Kosolapov V.M. *Geneticheskie resursy rasteniy i uskorenie selektsionnogo protsessa* [Genetic resources of plants and acceleration of the breeding process]. Moscow: Ugreshskaya tipografiya, 2016, 172 p.
- [7] *Molekulyarno-geneticheskie i biokhimicheskie metody v sovremennoy biologii rasteniy* [Molekulyarno-geneticheskie i biokhimicheskie metody v sovremennoy biologii rasteniy]. Eds. V.V. Kuznecov, V.V. Kuznecov, G.A. Romanov. Moscow: BINOM, 2012, 487 p.
- [8] Karpechenko K.A., Karpechenko I.Yu., Zemlyanukhina O.A., Veprintsev V.N. Kondrat'eva A.M., Karpechenko N.A., Kalaev V.N. *Izuchenie metabolizma plusovykh derev'ev duba chereshchatogo (Quercus Robur L.)* [Studying the metabolism of plus-sized oak trees (*Quercus Robur* L.)]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research], 2013, no. 1, pp. 287–291.
- [9] Chebotarev P.A., Chebotareva V.V., Storozhenko V.G. *Formovoe raznoobrazie zheludey duba v dubravakh lesostepi* [The form diversity of oak acorns in the oak forests of the forest-steppe]. *Vestnik BGAU* [Bulletin of the BGAU], 2020, no. 4, pp. 67–72.

- [10] Younis A., Ramzan F., Ramzan Y., Zulfiqar F., Ahsan M., Lim K.B. Molecular Markers Improve Abiotic Stress Tolerance in Crops: A Review. *Plants*, 2020, no. 9(10), pp. 1–16. <https://doi.org/10.3390/plants9101374>
- [11] Nadeem M.A., Nawaz M.A., Shahid M.Q., Doğan Y., Comertpay G., Yıldız M., Hatipoğlu R., Ahmad F., Alsaleh A., Labhane N., Özkan H., Chung G., Baloch F.S. DNA molecular markers in plant breeding: current status and recent advancements in genomic selection and genome editing. *Biotechnology, Biotechnological Equipment*, 2018, v. 32, pp. 261–285. DOI: 10.1080/13102818.2017.1400401
- [12] Boronnikova S.V. *Molekulyarno-geneticheskiy analiz i otsenka sostoyaniya genofondov resursnykh vidov rasteniy Permskogo kraya* [Molecular genetic analysis and assessment of the state of gene pools of resource plant species of the Perm region]. Perm': Perm State National Research University, 2013, 223 p.
- [13] Semerikova S.A., Isakov I.Yu., Semerikov V.L. *Izmenchivost' khloroplastnoy DNK i filogeografiya duba chereschatogo Quercus robur L. v vostochnoy chasti areala* [Variability of chloroplast DNA and phylogeography of the pedunculate oak *Quercus robur* L. in the eastern part of the range]. *Genetika* [Genetics], 2021, v. 57(1), pp. 56–71. DOI: 10.31857/S0016675821010136
- [14] Deguilloux M.-F., Dumolin-Lapegue S., Gielly L., Grivet D., Petit R.J. A set of primers for the amplification of chloroplast microsatellites in *Quercus*. *Molecular Ecology Notes*, 2003 no. 3, pp. 24–27. DOI: 10.1046/j.1471-8286.2003.00339.x
- [15] Prishnivskaya Ya.V., Krasil'nikov V.P., Boronnikova S.V. *Molekulyarno-geneticheskaya identifikatsiya populyatsiy Pinus Sylvestris L. na vostoке russkoy ravniny na osnovanii polimorfizma ISSR-markerov* [Molecular genetic identification of *Pinus Sylvestris* L. populations in the east of the Russian plain on the basis of polymorphism of ISSR markers]. *Vestnik Permskogo universiteta* [Bulletin of the Perm University], 2016, v. 2, pp. 171–175.
- [16] Kamev A.M., Antonova O.Yu., Dunaeva S.E., Gavrilenko T.A., Chukhina I.G. *Molekulyarnye markery v issledovaniyakh geneticheskogo raznoobraziya predstaviteley roda Rubus L. i perspektivy ikh primeneniya v selektsii* [Molecular markers in studies of the genetic diversity of representatives of the genus *Rubus* L. and prospects for their application in breeding]. *Vavilovskiy zhurnal genetiki i selektsii* [Vavilov J. of Genetics and Breeding], 2020, v. 24, no. 1, pp. 20–30. DOI 10.18699/VJ20.591.
- [17] Kloch M., Hawliczek-Strulak A.A., Swrecka-Belniak A.A. Molecular markers in forest management and tree breeding: a review. *Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW Forestry and Wood Technology*, 2015, no. 92, pp. 193–199.
- [18] Kesic L., Cseke K., Orlovic S., Stojanović D.B., Kostić S., Benke A., Borovics A., Stojnić S., Avramidou E.V. Genetic Diversity and Differentiation of Pedunculate Oak (*Quercus robur* L.). Population at the Southern Margin of its Distribution Range – Implications for Conservation. *Diversity*, 2021, v. 13, pp. 371–385. <https://doi.org/10.3390/d13080371>
- [19] Kulakov E.E., Vorobyeva E.A., Sivolapov V.A., Karpechenko N.A. *Otsenka polimorfizma duba chereschatogo (Quercus robur) s pomoshch'yu SSR-analiza* [Petiole Oak (*Quercus robur*) polymorphism evaluation by SSR-analyzing]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 4, pp. 44–51. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-4-44-51
- [20] Chokheli V.A., Kagan D.I., Varduni T.V., Kozlovskiy B.L., Sereda M.M., Kapralova O.A., Dmitriev P.A., Padutov V.E. *Ekologo-geneticheskaya differentsiatsiya tsenopopulyatsiy Quercus robur L. na territorii Rostovskoy oblasti s primeneniem ISSR-markerov* [Ecological and genetic differentiation of coenopopulations of *Quercus robur* L. on the territory of the Rostov region using ISSR markers]. *Turczaninowia* [Turczaninowia], 2018, v. 21, no. 4, pp. 161–167. DOI: 10.14258/turczaninowia.21.4.16
- [21] Ballian D, Belleti P, Ferrazzini D, Bogunic F, Kajba D. Genetic variability of Pedunculate Oak (*Quercus robur* L.) in Bosnia and Herzegovina. *Periodicum Biologotum*, 2010, v. 112, pp. 353–362.
- [22] Yanbaev R.Yu., Gabbitova A.A., Sultanova R.R., Boronnikova S.V., Yanbaev Yu.A. *ISSR-analiz polimorfizma DNK duba chereschatogo: argumenty v pol'zu ispol'zovaniya dlya lesovosstanovleniya semyan mestnykh nasazhdeniy* [ISSR-analysis of DNA polymorphism of oak petiole: arguments in favor of using seeds of local plantings for reforestation]. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Proceedings of the Orenburg State Agrarian University], 2017, no. 1 (63), pp. 220–222.
- [23] Kovalevich O.A., Kagan D.I. *Genogeografiya duba chereschatogo na osnove molekulyarnogo analiza khloroplastnoy DNK* [Genogeography of English oak based on molecular analysis of chloroplast DNA]. *Trudy BGTU. Seriya I, Lesnoe khozyaystvo* [The works of BSTU. Series I, Forestry], 2010, v. XVIII, pp. 281–283.
- [24] Bilous S., Prysiazhniuk L., Chernii S., Melnyk S., Marchuk Y., Likhanov A. Genetic characterisation of centuries-old oak and linden trees using SSR markers. *Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry*, 2022, v. 64 (1), pp. 58–68. DOI: 10.2478/ffp-2022-0006
- [25] Padutov V.E. *Protsessy gibrizatsii duba chereschatogo i duba skal'nogo po rezul'tatam molekulyarno-geneticheskogo analiza* [The processes of hybridization of pedunculate oak and rocky oak according to the results of molecular genetic analysis]. *Trudy BGTU* [The works of BSTU], 2021, v. 1(2), pp. 93–102. DOI: <https://doi.org/10.52065/2519-402X-2021-246-12-93-102>
- [26] Baranov N.I., Kurbatskiy N.P. *Taksatsiya lesesek* [Taxation of cutting areas]. Moscow, Leningrad: Goslesbumizdat, 1951, 120 p.
- [27] Smirnova O.V., Zaugol'nova L.B., Khanina L.G., Bobrovskiy M.V., Toropova N.A. *Populyatsionnye i fitotsenoticheskie metody analiza bioraznoobraziya rastitel'nogo pokrova* [Population and phytocenotic methods of analyzing the biodiversity of vegetation cover]. *Sokhranenie i vosstanovlenie bioraznoobraziya* [Conservation and restoration of biodiversity], 2002, pp. 145–194.
- [28] Artaev O.N., Bashmakov D.I., Bezina O.V. *Metody polevykh ekologicheskikh issledovaniy* [Methods of field environmental research]. Ed. A.B. Ruchin. Saransk: Izd-vo Mordovskogo un-ta, 2014, 412 p.

- [29] Martynov A.N., Mel'nikov E.S., Kovyazin V.F., Anikin A.S. *Osnovy lesnogo khozyaystva i taksatsiya lesa* [Fundamentals of forestry and forest taxation]. St. Petersburg: Lan', 2022, 432 p.
- [30] Alekseev V.A., Chertov O.G., Sergeychik S.A. *Lesnye ekosistemy i atmosfernoje zagryaznenie* [Forest ecosystems and atmospheric pollution]. Ed. V.A. Alekseev. Leningrad: Nauka, 1990, 200 p.
- [31] Semenyutina A.V., Khuzhakhmetova A.Sh., Dolgikh A.A., Semenyutina V.A., Tsoy M.V. *Analiz bioresursnykh kollektiy po klimaticheskim ritmam i fenologicheskim protsessam* [Analysis of bioresource collections on climatic rhythms and phenological processes.]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Successes of modern natural science], 2021, no. 2, pp. 39–45.
- [32] Semenyutina A.V. *Dendroflora lesomeliorativnykh kompleksov* [Dendroflora of forest reclamation complexes]. Ed. I.P. Svincov. Volgograd: VNIALMI, 2013, 266 p.
- [33] Popova A.S., Starukhina A.O., Zaytsev V.G. *Sravnitel'nyy analiz metodov uskorennoy vydeleniya DNK iz rastitel'nogo materiala* [Selection and optimization of DNA extraction methods from various plant materials]. *Vestnik PGU* [Bulletin of the State Technical University], 2022, no. 53, pp. 69–76.
- [34] Kulakov E.E., Sivolapov V.A., Vorob'eva E.A., Sivolapov A.I. *Geneticheskaya izmenchivost' listvenitsy Sukacheva (Larix sukaczewii Dyl.) v geograficheskikh kul'turakh pod Voronezhem* [Genetic variability of Sukachev's larch (*Larix sukaczewii* Dyl.) in geographical cultures near Voronezh]. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forest engineering magazine], 2018, no. 1 (29), pp. 35–42. DOI: 10.12737/article_5ab0dfbc03a703.71494463
- [35] Ryabukha A.F., Kuz'min P.A. *Podbor i optimizatsiya metodov ekstraktsii DNK iz list'ev gledichii trekhkolyuchkovoy (Gleditsia triacanthos L.)* [Selection and optimization of DNA extraction methods from the leaves of Gleditsia tricolor (*Gleditsia triacanthos* L.)]. *Agrarnyy vestnik Urala* [Agrarian Bulletin of the Urals], 2024, v. 24, no 02, pp. 207–217.
- [36] Chokheli V., Kozlovsky B., Sereda M., Lysenko V., Fesenko I., Varduny T., Kapralova O., Bondarenko E. Preliminary comparative analysis of phenological varieties of *Quercus robur* by ISSR-markers. *J. of Botany*, 2016, t. 2016, p. 7910451. DOI:10.1155/2016/7910451
- [37] Lepais O., Leger V., Gerber S. High throughput microsatellite genotyping in oak species. *Silvae Genetica*, 2006, v. 55, pp. 238–240.
- [38] Rzhavskiy S.G., Kondpat'eva A.M. *Ispol'zovanie ISSR- i SSR-markerov dlya genotipirovaniya nekotorykh vidov klena (Acer)* [The use of ISSR- and SSR markers for genotyping some maple species (*Acer*)]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva* [Proceedings of the St. Petersburg Scientific Research Institute of Forestry], 2022, no. 3, pp. 16–24.
- [39] Nei M. Genetic distance between populations. *American Naturalist*, 1972, v. 106, pp. 283–292.
- [40] Leberg P.L. Estimating Allelic Richness: Effects of Sample Size and Bottlenecks. *Molecular Ecology*, 2002, v. 11, pp. 2445–2449. <https://doi.org/10.1046/j.1365-294X.2002.01612.x>

The work was carried out under the State task 'Search for selection-valuable genetic material for creation of new genotypes of tree and shrub species by molecular breeding methods' (№FNFE-2022-0009).

Authors' information

Ryabukha Anna Fedorovna  — Cand. Sci. (Pharmaceutical), Leading Researcher at the Laboratory of Molecular breeding, Federal Research Center of Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, ryabuha-af@vfanc.ru

Kuz'min Petr Anatol'evich — Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Acting Head of Laboratory of Molecular breeding, Federal Research Center of Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, kuzmin-p@vfanc.ru

Received 12.03.2024.

Approved after review 02.07.2024.

Accepted for publication 04.02.2025.

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

ОСОБЕННОСТИ КОМПЛЕКСОВ ВРЕДИТЕЛЕЙ И ПАТОГЕНОВ В ГОРОДСКИХ НАСАЖДЕНИЯХ Г. НАБЕРЕЖНЫЕ ЧЕЛНЫ

А.В. Селиховкин¹✉, Е.Ю. Варенцова¹, А.Ф. Потокин¹,
Х.Г. Мусин², Н.А. Мамаев¹, М.Б. Мартирова¹

¹ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова»,
Россия, 194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., д. 5

²ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет», Россия, 420015, Казань,
ул. К. Маркса, д. 65

a.selikhovkin@mail.ru

Выполнено обследование всех категорий насаждений г. Набережные Челны. Исследован видовой состав и жизненные формы растений, проведен анализ видового состава энтомофауны фитофагов и фитопатогенных организмов, развивающихся на этих растениях. Основное внимание уделено организмам, которые могут привести к гибели или существенно ухудшить состояние и эстетическую ценность деревьев и кустарников. Выявлено 108 видов растений, относящиеся к 24 семействам, которые относительно равномерно распределены по районам города. Установлена специфичность видового состава и распространенности вредителей и патогенов. Доминирующие виды вредителей типичны для городских насаждений региона, однако некоторые широко распространенные автохтонные и инвазионные виды вредителей-филлофагов и патогенов отсутствуют или имеют очень низкую плотность популяций. В частности, не обнаружены мины, характерные для чешуекрылых сем. Gracillariidae, в том числе инвазионных вредителей — липовой моли-пестрянки *Ph. issikii* и охридского минера *Cameraria ohridella*, несмотря на то, что эти виды широко распространены в Республике Татарстан. Установлено, что наиболее распространенные заболевания — бактериальная водянка и корневая гниль, вызываемая опенком, характерны для региона в целом. В парках с доминированием сосны наибольшую опасность представляют сосновые лубоеды *Tomicus piniperda* и *T. minor*, корневая губка *Heterobasidion annosum*, опенок *Flammulina velutipes* и сосновая губка *Porodaedalea pini*. Наиболее сильно этими вредителями и патогенами повреждены насаждения парков «Прибрежный» и «Комсомольский», представляющие собой рефугиумы естественных сосновых лесов региона. Часто встречаются некротико-раковые заболевания. В Парке Победы почти все ели поражены язвенным раком. В лиственных насаждениях повсеместно распространена бактериальная водянка.

Ключевые слова: городские насаждения, вредители и патогены, древесно-кустарниковая флора, доминирующие виды

Ссылка для цитирования: Селиховкин А.В., Варенцова Е.Ю., Потокин А.Ф., Мусин Х.Г., Мамаев Н.А., Мартирова М.Б. Особенности комплексов вредителей и патогенов в городских насаждениях г. Набережные Челны // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 2. С. 55–69.
DOI: 10.18698/2542-1468-2025-2-55-69

Видовой состав древесных растений в городских насаждениях на севере и нередко в центральной части России, как правило, существенно отличается от такового в лесных экосистемах, прилегающих к городу. Особенно это характерно для крупных городов, вкладывающих значительные средства в создание городского ландшафта [1–5]. Соответственно, в городской среде формируются комплексы вредителей [6–15] и патогенов со специфической структурой, которые обуславливают заболеваемость древесных растений [16]. Кроме специфического видового состава насаждений городская среда характеризуется существенно более высокой температурой, загрязнением и

сложными почвенно-гидрологическими условиями, что вызывает ослабление растений. В свою очередь, это позволяет вредителям и патогенам успешно осваивать урбанизированную среду, продвигаясь до северной границы ареала их растений-хозяев [15–19].

В городах, сформировавшихся несколько сотен лет тому назад, видовой состав вредителей и патогенов довольно стабилен, однако его пополнение продолжается за счет инвазионных видов. Изменяется и структура доминирования. В отношении насекомых этот процесс удалось пронаблюдать в насаждениях Санкт-Петербурга [9, 12, 20] и в некоторой степени для других городов России [7, 8, 13–15]. Об относительно недавно созданных городах со значимой ландшафтной архитектурой, включающей в себя

разнообразные виды древесных растений, публикаций недостаточно. Например, есть сведения о комплексах вредителей тополей в городах Сыктывкар [14], Братск и Усть-Илимск [21–23], хотя видовой состав насаждений здесь весьма узок. В этом плане большой интерес представляет г. Набережные Челны с населением более полумиллиона человек. Статус города Набережные Челны получил в 1930 г. Интенсивное развитие города началось в 1969–1970 гг. в связи с началом создания Камского автомобильного завода [24]. Масштабное озеленение Набережных Челнов началось в середине 1970-х годов [25]. К настоящему моменту возраст большинства насаждений города составляет 25–35 лет, т. е. комплексы насаждений города представлены относительно молодыми посадками. В городе много парков, аллеиных посадок и скверов, где произрастают различные виды деревьев и кустарников [26].

Цель работы

Цель работы — анализ доминирующих видов вредителей и патогенов древесных растений в г. Набережные Челны.

Материалы и методы

Объекты и методика проведения обследования. Территория города расположена на стыке двух природных зон — лесной и степной. По р. Каме проходит южная граница подзоны хвойно-широколиственных лесов (Предкамье) и северная граница лесостепной зоны (Закамье). Климат обследуемой территории умеренный, переходный от умеренно континентального к континентальному, характеризуется довольно большими годовыми амплитудами температуры воздуха. Зима длится почти 5 мес., среднесуточная температура ниже 0° устанавливается с начала ноября до конца марта. Среднегодовое количество осадков — 652 мм, распределение осадков равномерное, с небольшим увеличением в летние и осенние месяцы.

Обследование городских насаждений проводилось в первой половине ноября 2022 г. Объектами обследования были все категории насаждений:

– общего пользования: парки, сады жилых районов, скверы, бульвары, озелененные участки у общественно-административных зданий, сады микрорайонов или сады при группах жилых домов, дворы или озелененные участки при жилых домах;

– ограниченного пользования: озелененные участки школ, детских садов и яслей, клубов, кинотеатров, поликлиник, библиотек и т. п., придомовые полосы, палисадники;

– защитного типа вдоль магистралей по границам микрорайонов со стороны неблагоприятных ветров, почвоукрепляющие посадки на откосах.

Наиболее крупные зеленые массивы города — парки «Победа», «Гренада», «Прибрежный» и «Комсомольский» (рис. 1).

В процессе работы определяли видовой состав древесных растений и их состояние. Фиксировали наличие патогенных образований и повреждений вредителями. В отношении вредителей и болезней насаждений основное внимание было направлено на организмы, которые могут привести деревья к гибели или существенно ухудшить их состояние и эстетическую ценность.

В связи с проведением исследований после окончания вегетационного периода, отсутствовала возможность наблюдать за видовым составом весеннего и весенне-летнего комплекса вредителей. Кроме того, усыхающие и усохшие деревья лиственных пород, в первую очередь лип и вязов, были вырублены в течение вегетационного сезона. В связи с этим причины их усыхания мы смогли оценить весьма предположительно. Однако в период обследования на лиственницах, березах и в меньшей степени на тополях сохранились листья (хвоя). Во многих местах, особенно в парках, не был убран лиственный опад. Это позволило оценить степень повреждения листьев в текущем году и установить наличие или отсутствие некоторых минирующих и галлообразующих вредителей. Определение видов вредителей проводилось по повреждениям и в случае обнаружения по личинкам. Для стволовых вредителей удалось установить с высокой достоверностью видовой состав доминирующих видов и групп. Для оценки плотности популяции сосновых лубоедов *Tomicus piniperda* (Linnaeus, 1758) и *T. minor* (Hartig, 1834) воспользовались методикой, предложенной А.Д. Масловым (табл. 1) [27]. Было заложено 10 учетных площадок по 1 м² в разных частях парка, на которых было подсчитано количество опавших побегов.

Определение типов болезней и их возбудителей проводилось по характерным признакам, плодовым телам, грибным структурам и типам гнили, а в отдельных случаях лабораторными методами [28, 29]. Уточнения видовой принадлежности проводилось в лабораторных условиях.

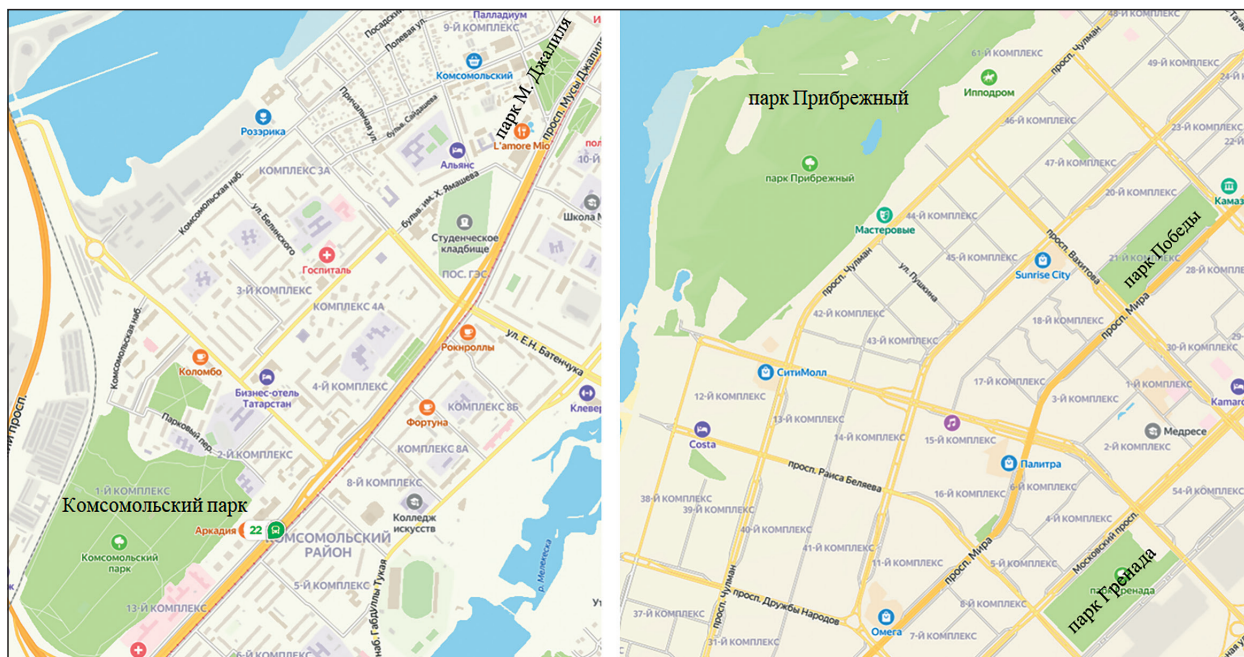


Рис. 1. Парки г. Набережные Челны
 Fig. 1. Parks in Naberezhnye Chelny

Таблица 1

**Придержки для оценки численности сосновых лубоедов
 в насаждении по интенсивности дополнительного питания [27]**
**Allowances for estimating the number of pine beetles in a plantation based
 on the intensity of supplementary feeding [27]**

Среднее число побегов на 1 м ²	Визуальная оценка числа побегов	Численность молодого поколения жуков	Запас жуков на 1 га (абсолютная численность), тыс. шт.
До 2	Единично	Нормальная	До 5,0
3...5	Повсеместно	Повышенная	10,0...20,0
6...10	Много	Высокая	25,0...40,0
Более 10	Очень много	Угрожающая	150,0 и более

При обследовании учитывалось, что не все дереворазрушающие грибы имеют многолетние плодовые тела.

Зачастую имеет место скрытое развитие гнили, диагностировать которую довольно сложно, особенно корневую или ствольную в начальной стадии ее развития. В этом случае использовались косвенные признаки — наличие на стволах глубоких механических повреждений, морозных трещин, ступенчатого или раневого рака, сухих сучьев или вершин, сухобокости, желваков и потеков смолы в нижней части стволов хвойных, закомелистости, наклона стволов как причины поражения корневой гнилью, скрытых дупел и др.

Результаты обследования.

Состав насаждений. В ходе обследования выявлены следующие типы зеленых насаждений:

– общего пользования: городские леса, парки, сады, скверы, бульвары и насаждения вдоль магистралей и улиц;

– специального назначения: насаждения санитарно-защитных зон (транспортных путей, промышленных предприятий).

Видовой состав насаждений г. Набережные Челны весьма разнообразен. Анализ флоры древесно-кустарниковых насаждений показал, что 108 видов растений относительно равномерно распределены по районам города.

Наибольшее количество видов отмечено в Центральном районе, так как здесь расположено много парков и специфических ландшафтов с аллеями, кулисами, бордюрами и другими вариантами использования древесных растений в дизайне городского пространства (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Распределение насаждений по систематическим группам и жизненным формам древесно-кустарниковой флоры г. Набережные Челны по районам

Distribution of plantations by systematic groups and life forms of tree and shrub flora in Naberezhnye Chelny by districts

Таксоны и жизненные формы	Всего	Комсомольский район	Центральный район	Автозаводский район
Семейство	24	22	23	20
Род	52	42	50	41
Вид	108	74	92	74
Дерево	50	37	43	40
Кустовидное дерево	14	8	12	8
Кустарник	43	29	36	26
Лиана	1	0	1	0

В составе зеленых древесно-кустарниковых насаждений выявлены виды деревьев и кустарников, относящиеся к 24 семействам. Наибольшим видовым разнообразием представлены семейства Розоцветные (31 вид), Сосновые и Ивовые (по 12 видов). Остальные семейства (21) представлены в количестве от одного до пяти видов.

В перечисленных выше типах зеленых насаждений г. Набережные Челны наиболее часто используются 25 видов деревьев, относящихся к девяти семействам:

– Сосновые (Pinaceae): лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.), лиственница Сукачева (*Larix sukaczewii* Dylis), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), ель колючая (*Picea pungens* Engelm.), ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.);

– Кипарисовые (Cupressaceae): туя западная (*Thuja occidentalis* L.);

– Сапиндовые (Sapindaceae): клен остролистный (*Acer platanoides* L.), клен татарский (*Acer tataricum* L.), клен ясенелистный (*Acer negundo* L.);

– Вязовые (Ulmaceae): вяз шершавый (*Ulmus glabra* Huds.), вяз приземистый (*Ulmus pumila* L.);

– Березовые (Betulaceae): береза пушистая (*Betula pubescens* Ehrh.), береза повислая или бородавчатая (*Betula pendula* Roth);

– Розоцветные (Rosaceae): яблоня домашняя (*Malus domestica* (Suckow) Borkh.), яблоня ягодная (*Malus baccata* (L.) Borkh.), черемуха обыкновенная (*Padus avium* Mill.), рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia* L.);

– Ивовые (Salicaceae): тополь дрожащий (*Populus tremula* L.), тополь белый (*Populus alba* L.), тополь сереющий (пирамидальный) (*Populus × canescens* (Aiton) Sm.), тополь черный (пирамидальный) *Populus nigra* f. *Pyramidalis*

(*Rozier*) Celak., ива козья (*Salix caprea* L.), ива ломкая (*Salix fragilis* L.);

– Мальвовые (Malvaceae): липа сердцевидная или мелколистная (*Tilia cordata* Mill.), липа европейская (*Tilia europaea* L.);

– Маслиновые (Oleaceae): ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior* L.).

Кроме того, широко представлено 45 видов кустарников, входящих в четырнадцать семейств:

– Сосновые (Pinaceae): сосна горная (*Pinus mugo* Turra);

– Розоцветные (Rosaceae): вишня кустарниковая, степная (*Cerasus fruticosa* Pall.), слива колючая, терн (*Prunus spinosa* L.), ежевика сизая (*Rubus caesius* L.), миндаль низкий (*Amygdalus nana* L.), рябина черноплодная (арония) (*Aronia melanocarpa* (Michx.) Elliott), кизильник блестящий (*Cotoneaster lucidus* Schldl.), пузыреплодник калинолистный (*Physocarpus opulifolius* (L.) Maxim.), роза морщинистая (*Rosa rugosa* Thunb.), роза майская (*Rosa majalis* Herrm.), роза иглистая (*Rosa acicularis* Lindl.), роза колючейшая (*Rosa spinosissima* L.), лапчатка кустарниковая (курильский чай) (*Potentilla fruticosa* L.), спирея Японская (*Spiraea japonica* L. f.), спирея иволистная (*Spiraea salicifolia* L.), рябинник рябинолистный (*Sorbaria sorbifolia* (L.) A. Braun);

– Лещиновые (Corylaceae): лещина обыкновенная (*Corylus avellana* (L.) H.Karst.);

– Крыжовниковые (Grossulariaceae): смородина колосистая (*Ribes spicatum* E. Robson), смородина альпийская (*Ribes alpinum* L.), смородина золотистая (*Ribes aureum* Pursh);

– Ивовые (Salicaceae): ива пурпурная (*Salix purpurea* L.), ива розмаринолистная (*Salix rosmarinifolia* L.);

– Маслиновые (Oleaceae): бирючина обыкновенная (*Ligustrum vulgare* L.), сирень обыкновенная (сорта) (*Syringa vulgaris* L.);

**Виды и группы доминирующих заболеваний, патогенов
и вредителей парках г. Набережные Челны**

Species and groups of dominant diseases, pathogens and pests in parks of Naberezhnye Chelny

Виды и заболевания	Парк «Прибрежный»	Парк «Комсомольский»	Парк имени Мусы Джалиля	Парк Победы	Парк «Гренада»
Насекомые					
<i>Tomicus piniperda</i>	+++	++	–	–	–
<i>Tomicus minor</i>	++	+	–	–	–
<i>Monochamus galloprovincialis</i>	+	+	–	–	–
<i>Ragium</i> sp.	+++	++	–	–	–
<i>Phaenops cyanea</i> (?)	+	+	–	–	–
Болезни и возбудители					
<i>Porodaedalea pini</i>	++	+		–	–
<i>Phellinus igniarius</i>			+	+	–
Бактериальная водянка	+	+++	+++		+++
Язвенный рак	+	+	+	+++	–
Смоляной рак	+	+	–	–	–
Корневая губка	++	++	–	–	–
<i>Примечание.</i> Доля деревьев повреждаемой породы: насекомые — относительно всех погибших деревьев (свежий и старый сухой) на момент обследования; патогены — относительно всех живых и погибших деревьев суммарно; «+» — 1...10 %; «++» — 10...20 %; «+++» — более 20 %.					

– Кизилковые (Cornaceae): свида белая (*Swida alba* (L.) Opiz);

– Жимолостные (Caprifoliaceae): жимолость татарская (*Lonicera tatarica* L.), жимолость обыкновенная (*Lonicera xylosteum* L.), снежнаягодник белый (*Symphoricarpos albus* (L.) S.F.Blake);

– Гортензиевые (Hydrangeaceae): гортензия крупнолистная (*Hydrangea macrophylla* (Thunb.) Ser.), чубушник венечный (*Philadelphus coronarius*), чубушник тонколистный (*Philadelphus tenuifolius* Rupr. & Maxim.), дейция амурская (*Deutzia amurensis* (Regel) Airy Shaw.);

– Адоксовые (Adoxaceae): калина обыкновенная (*Viburnum opulus* L.), калина гордовина (*Viburnum lantana* L.), бузина черная (сорта) (*Sambucus nigra* L.), бузина кистистая (сорта) (*Sambucus racemosa* L.);

– Барбарисовые (Berberidaceae): барбарис обыкновенный (формы по окраске) (*Berberis vulgaris* L.), барбарис Тунберга (формы по окраске) (*Berberis thunbergii* DC.);

– Бобовые (Fabaceae): карагана кустарниковая (*Caragana frutex* (L.) K. Koch), карагана древовидная (*Caragana arborescens* Lam.), аморфа кустарниковая (*Amorpha fruticosa* L.);

– Бересклетовые (Celastraceae): бересклет бородавчатый (*Euonymus verrucosus* Scop.);

– Анакардиевые (Anacardiaceae): скүмпия кожѳвенная (*Cotinus coggygria* Scop.).

Насекомые-вредители. Осмотр крон сосен и елей, а также листопадных деревьев, на которых сохранилась хвоя или листва — лиственниц, берез и тополей, а также осмотр опавшей листвы показал, что повреждения ассимиляционного аппарата незначительны. Характерные повреждения листьев — объедание, минирование и скелетирование отмечались единично. На листьях тополей и берез встречались мины молей-малюток сем. Nepticulidae и минирующих мушек сем. Agromyzidae. Доля поврежденных листьев во всех случаях не превышала 10 %. Такой уровень повреждения характеризуется как несущественный [30, 31]. Объедание листьев в наибольшей степени отмечено на тополе и в меньшей — на березе. Наиболее вероятно, что эти повреждения нанесены пяденицами (сем. Geometridae), но также мы отметили повреждения, характерные и для других групп чешуекрылых, в особенности волнянок (сем. Erebidae). На березе зафиксировано объедание листьев долгоносиками в период дополнительного питания и, в частности, возможно, березовым серебристым долгоносиком *Phyllobius argentatus* (Linnaeus, 1758).

Среди сосущих вредителей на отдельных елях отмечены хермесы, судя по повреждениям елово-лиственничный хермес *Adelges laricis* Vallot, 1836 (сем. Adelgidae) [видовая принадлежность нуждается в уточнении].

В парке «Прибрежный» и в Парке культуры и отдыха «Комсомольский» отмечена повышенная численность большого и малого сосновых лубоедов *Tomicus piniperda* и *T. minor* (табл. 3). Количество опавших после дополнительного питания лубоедов побегов варьировало от одного до 11 шт. на 1 м² (рис. 2) и в среднем составляло 4,5 шт./м² в разных участках парка. Суммарная плотность популяций (короедный запас) большого и малого сосновых лубоедов составляет около 20 тыс. жуков на 1 га.

Единично встречаются ходы черных усачей, по-видимому, черного соснового усача *Monochamus galloprovincialis* (Olivier, 1795), а также ходы златок, вероятно синей сосновой златки *Phaenops cyanea* (Fabricius, 1775). Часто встречаются усачи рагиумы *Ragium* sp. (см. табл. 3).

Фитопатогенные организмы. В результате визуального осмотра стволов и ветвей хвойных и лиственных пород выявлены некоторые патогены, вызывающие некрозно-раковые заболевания. Потенциальную угрозу для лиственных насаждений Набережных Челнов представляют бактериальная водянка, вызываемая прежде всего бактерией *Erwinia nimipressurales* а также *Pseudomonas cerasi* и *Pseudomonas syringae*. Эти патогены поражают ветви и стволы древесных пород различного возраста. Происходит отмирание луба, коры и древесины, что приводит сначала к ажурности крон пораженных деревьев, а затем к их гибели. Наиболее крупные очаги этого заболевания зафиксированы в промышленной зоне Автозаводского района на березе повислой, вязе гладком и тополях бальзамическом, сереющем и особенно на тополях черном и дрожащем. На территории Комсомольского сквера и Парка имени Мусы Джалиля (ул. Гагарина) в Комсомольском районе более 50 % тополей поражены бактериальной водянкой. Дальнейшее распространение этого заболевания может привести к гибели значительной части насаждений (см. табл. 3). По-видимому, бактериальной водянкой поражено 87 % лип в северо-западной части парка «Гренада» и 20 % лип в аллее у памятника строителям завода «КамАЗ» (рис. 3).

Из хвойных пород некрозно-раковым заболеваниям наиболее подвержена ель европейская. Распространенность раневого (язвенного) рака *Sarea difformis* (Fr.) Fr. (syn. *Biatorrella difformis* (Fr.) Vain.) и др. в Парке Победы Автозаводского района составила почти 100 %. Это заболевание сопровождается обильным смолотечением, появлением опухолевых ран, затем сухобокости. В целом деревья отстают в росте. Раневой рак в некоторых регионах является основным массовым заболеванием ели [32]



Рис. 2. Молодые побеги сосны после «стрижки» кроны сосновыми лубоедами, парк «Прибрежный» (фото А.В. Селиховкина, г. Набережные Челны, ноябрь 2022 г.)

Fig. 2. Young shoots of pine trees after crown damage by pine beetles, «Pribrezhny» park (photo by A.V. Selikhovkin, Naberezhnye Chelny, November 2022)

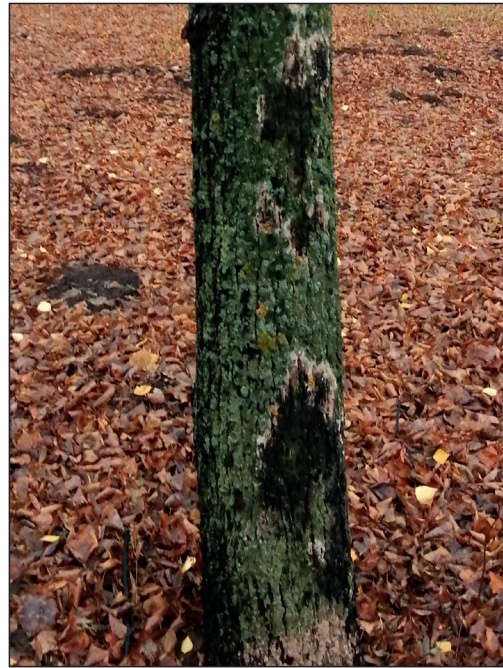
и может выступать как один из ключевых факторов, способствующих распространению стволовых вредителей [12].

Взрослые и молодые деревья сосны скрученной, обыкновенной, горной и ели европейской, поражены побеговым раком (гриб *Scleroderris lagerbergii* Gremm.), что приводит к незначительному отставанию в росте, снижению декоративных качеств деревьев. На соснах встречается смоляной рак (рак-серянка) сосны *Cronartium pini* (Willd.) Jørst. (syn. *Cronartium flaccidum* (Alb. & Schwein) G. Winter) и *Peridermium pini* (Willd.) J.C. Schmidt & Kunze), приводящий к суховершинности деревьев.

Серьезная проблема связана с распространением стволовой и корневой гнили, вызываемой опенком зимним *Flammulina velutipes* (Curtis) Sing. Интенсивному развитию очагов опенка во взрослых насаждениях способствуют нарушение гидрологического режима и, возможно, недостаток почвенного питания, высокая рекреационная нагрузка или хозяйственная деятельность, травмирующая корни. Распространению опенка и заражению новых ослабленных деревьев способствует теплая и сырая погода. Корневая и стволовая гниль от опенка на таких древесных породах, как тополь черный (итальянский), рябина обыкновенная, вяз гладкий, вяз приземистый, клен остролистный и других выявлена повсеместно, но наибольшую озабоченность вызывает состояние тополей в насаждениях Парка имени Мусы Джалиля.



a



б

Рис. 3. Бактериальная водянка на вязе приземистом (*a*) и липе европейской (*б*)
Fig. 3. Bacterial dropsy on Siberian elm (*a*) and Common lime (*б*)



Рис. 4. Парк «Прибрежный». Признаки очага корневой губки — наличие наклоненных деревьев с надрывом корней (фото Е.Ю. Варенцовой, Набережные Челны, ноябрь 2022 г.)

Fig. 4. «Pribrezhnyy» Park. Signs of rootfungus locus — three being tilted trees with torn roots (photo by E.Y. Varentsova, Naberezhnye Chelny, November 2022)



Рис. 5. Парк «Прибрежный» (веревочный парк). Пестрая ситовая гниль от корневой губки (фото Е.Ю. Варенцовой, Набережные Челны, ноябрь 2022 г.)

Fig. 5. «Pribrezhnyy» Park (rope park). Mottled rot caused by rootfungus (photo by E. Yu. Varentsova, Naberezhnye Chelny, November 2022)



Рис. 6. Механические повреждения стволов и корней в парке «Комсомольский» (фото Е.Ю. Варенцовой, Набережные Челны, ноябрь 2022 г.)

Fig. 6. Mechanical damage of trunks and roots in «Komsomolsky» Park (photo by E.Yu. Varentsova, Naberezhnye Chelny, November 2022)



Рис. 7. Усыхание сосен по периферии «окон» в парке «Комсомольский» (фото Е.Ю. Варенцовой, Набережные Челны, ноябрь 2022 г.)

Fig. 7. Drying of pine trees on the opening periphery in «Komsomolsky» Park (photo by E.Yu. Varentsova, Naberezhnye Chelny, November 2022)

Опенок зимний представляет угрозу и для хвойных пород. В Автозаводском районе данным патогеном поражена ель европейская, в Приморском парке — сосна обыкновенная.

Особую озабоченность вызывает состояние 54-летних посадок сосны в парке «Прибрежный», пораженных корневой губкой *Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref. — фитопатогеном номер один по вредоносности. Степень ослабления и зараженности насаждения губкой, распространенной по всей территории парка, на текущий период слабая — ослаблено и заражено 10 % деревьев. Усыхающие деревья единичны, однако наблюдается тенденция к переходу к средней степени ослабления. На некоторых участках ослаблено и заражено от 11...20 % деревьев, происходит отмирание деревьев небольшими куртинами, формирующих до четырех окон отмирания на 1 га.

Выявлены как формирующиеся, так и действующие очаги корневой губки, для которых характерно наличие ослабленных, усыхающих деревьев, свежего и старого сухостоя, свежего и старого ветровала, наклонившихся деревьев. Групповое усыхание деревьев и последующие санитарные рубки приводят к формированию

«окон», которые с каждым годом расширяются, что может привести к распаду насаждения (рис. 4, 5). Самосев, появляющийся в очагах, заражается грибом и погибает.

В парке «Комсомольский» отмечены очаги усыхания сосны. Это может быть связано как с повышенной активностью энтомовредителей, так и с возможным формированием очагов корневой гнили, вызываемой корневой губкой. На обследуемой территории есть все предпосылки для развития этого патогена: данные насаждения — монокультуры сосны. Здесь отмечен высокий процент повреждений стволов и корней деревьев, нанесенных в результате благоустройства парка, а именно обустройства дорожной сети (рис. 6). На некоторых участках наблюдается куртинное усыхание сосен вокруг «окон» — ранее усохших и удаленных деревьев (рис. 7).

Среди дереворазрушающих грибов, вызывающих стволовые гнили, следует выделить сосновую губку *Porodaedalea pini* (Brot.) Murrill (syn. *Phellinus pini* (Brot.) Pilát) в парке «Прибрежный». Развитие этого патогена часто приводит к образованию дупел и является причиной бурелома. На лиственных породах: ивах, тополях, вязах, кленах, березе единично встре-

чается ложный трутовик *Phellinus igniarius* (L. ex Fr.) Quel. возбудитель белой ядровой гнили лиственных пород. Пораженные деревья представляют угрозу, так как снижена прочность древесины. Встречается также чешуйчатка жирная *Fholilta adiposa* Fr; настоящий трутовик *Fomes fomentarius* (L) Gill; вешенка обыкновенная *Pleurotus ostreatus* P. Kumm. Особый интерес представляет траметес душистый *Trametes suaveolens* (Fr.) Fr. на осине — редкий вид. Трутовик, распространенный в основном в лесостепной зоне Южного Приобья, поражает осину [30]. На березах в сквере «Комсомольский» распространен стереум пурпурный *Chondrosnereum purpureum* (Pers.) Puzar. — это патоген различных лиственных деревьев, он обычно встречается на старых пнях и мертвой древесине, но может быть и серьезным паразитом живых деревьев.

Патогены, вызывающие поражение хвои и листьев единично встречались во всех насаждениях города. Среди них следует отметить шютте обыкновенное сосны *Lophodermium pinastri* Chev. и *Lophodermium seditiosum* Mint. Stal., шютте обыкновенное ели *Lirula macrospora* (R. Hartig) Darker (= *Lophodermium macrosporum* Hart.); ржавчину хвои ели *Chrysomyxa abietis* (Wallr.) Ung. *Chrysomyxa ledi* de Bay [29, 33]. Из листовых инфекций широко распространена мучнистая роса листьев деревьев и кустарников, вызываемая грибами р.р. *Sawadaea*, *Uncinula*, *Phyllactina*, *Podospaera*. На вязе гладком встречается черная пятнистость листьев *Dothidella ulmi* (C.-J. Duval). Данные заболевания являются «фоновыми» для взрослых деревьев и не приводят к их ослаблению.

Кроме указанных выше заболеваний выявлены неинфекционные болезни растений, приводящие к некрозам листьев, хвои и усыханию, особенно хвойных пород. Распространены такие патологии стволов, как механические повреждения, морозобойные трещины, обретенные и обломанные скелетные ветви, которые служат воротами для дереворазрушающих грибов и некрозно-раковых заболеваний [34].

Результаты и обсуждение

Флористическое разнообразие древесно-кустарниковой растительности г. Набережные Челны довольно высокое и включает в себя более 100 видов, многие из которых типичны для насаждений региона. Планировочные решения ландшафтной архитектуры грамотны, однако внутри древесно-кустарниковых парковых массивов наблюдается множество хаотично проложенных тропинок. Это приводит

к деградации живого напочвенного покрова и придаточных поверхностных корней деревьев. В результате в составе древесных насаждений появляется достаточное количество деревьев с поврежденной корой и корнями. Эти повреждения служат воротами для инфекции.

Для предотвращения дальнейшей рекреационной деградации парковой растительности целесообразно высадить вдоль основных транзитных мощенных парковых дорожек защитные полосы из низкорослых кустарников (спирея средняя, спирея иволистная, снежноягодник белый и др.). Необходимо выделить наиболее востребованные второстепенные внутрипарковые тропинки и провести их оборудование с целью дальнейшей эксплуатации отдыхающими. В этих насаждениях возможна организация экологических троп, которые будут востребованы населением и гостями города.

Береговая линия реки Камы озеленена слабо. Для предотвращения береговой эрозии и стекания загрязненных поверхностных вод здесь нужно создать водоохранные древесно-кустарниковые (различные виды древесных и кустарниковых видов ив и тополей) и газонные насаждения.

Насаждения сосны в двух больших парках — рефугиумы лесных экосистем. В них представлены типичные стволовые вредители, характерные для данного региона. Довольно высокая плотность популяций сосновых лубоедов обусловлена также тем, что эти древостои ослаблены за счет высокой рекреационной нагрузки. В парках ведется благоустройство: проводится освещение, прокладываются дорожки, — что приводит к травмированию корневых систем деревьев. Часть насаждений пройдена низовыми пожарами. Это также послужило причиной развития очагов наиболее опасного фитопатогена — корневой губки *Heterobasidion annosum* в 54-летних посадках сосны в парках «Прибрежный» и «Комсомольский», что весьма характерно для подобных ситуаций [37]. В Республике Татарстан заболеванию подвержены чистые хвойные сосновые насаждения, особенно это касается сосновых монокультур, созданных на бывших пашнях, пустырях или вырубках насаждений, пораженных корневой губкой. Интенсивное развитие гнили в корнях ведет к быстрому распространению болезни в пределах насаждения. Ухудшение состояния сосняков республики произошло во время засухи 2010 г. [38]. В Набережных Челнах наряду с корневой губкой большую проблему представляют стволовая и корневая гниль, вызываемая опенком зимним *Flammulina velutipes*, а также стволовая гниль у сосны,

вызываемая сосновой губкой *Phellinus pini*. В отношении перечисленных вредителей и патогенов необходим регулярный мониторинг их популяций и распространенности, а также уборка зараженных деревьев. Вырубка заселенных лубоедами сосен должна проводиться строго с учетом срока вылета жуков.

Бактериальная водянка распространена во всех лиственных насаждениях и представляет весьма серьезную опасность, так как усыхание зараженных деревьев неминуемо.

Распространенность дереворазрушающих грибов, вызывающих стволовые гнили невелика, что обусловлено незначительным возрастом зеленых насаждений. В большей степени поражены сосны в культурах и быстрорастущие лиственные породы: тополя, ивы, березы и др.

В комплексе вредителей ассимиляционного аппарата нами не обнаружены типичные виды минирующих чешуекрылых, широко распространенные на территории России, в Европе и Азии. Отметим, что листья тополей, берез и лип сохранились очень хорошо. Извилистые мины и объедания были хорошо заметны. Мин типа птихоном, присущих молям-пестрянкам, обнаружено не было. Полное отсутствие мин, характерных для молей-пестрянок сем. *Gracillariidae*, в том числе *Phyllonorycter populifoliella* (Treitschke, 1833), *Ph. pastorella* (Zeller, 1846) *Ph. apparella* (Herrich-Schäffer, 1855) и др., т. е. видов, широко распространенных в этом регионе [35], — весьма странное явление. При этом различные виды тополей, относящиеся к разным секциям, весьма многочисленны в городских посадках. Нет и инвазионных видов из этого семейства — липовой моли-пестрянки *Ph. issikii* (Kumata, 1963) и охридского минера *Cameraria ohridella* Deschka & Dimić, 1986, вторичный ареал которых охватывает территорию Республики Татарстан [35, 36]. Не были обнаружены мины, присущие минирующим пилильщикам и молям-пестрянкам и на березе. Однако в данном случае поврежденные листья могли не сохраниться вследствие того, что большая часть листовой пластинки была повреждена. У нас нет возможности утверждать, что этих видов в городе нет. Однако если они есть, то плотность их популяций крайне низка, что так же весьма необычно.

Вполне вероятно, что отсутствие типичных видов минирующих вредителей обусловлено тем, что насаждения были созданы относительно недавно и довольно далеко расположены от других городов. Соответственно, имеющаяся кормовая база не освоена минерами. В этом плане представляется важным проведение весенне-летних исследований видового состава скрытно-

и открытоживущих насекомых-фитофагов как на территории Набережных Челнов, так и в близлежащих городах. Это позволит верифицировать полученные данные и проследить процесс формирования комплексов вредителей и патогенов в урбоценозах.

Выводы

Большая часть насаждений г. Набережные Челны представлена относительно молодыми древесными растениями, видовой состав и распространенность вредителей и болезней древесных растений в них весьма специфичны. Доминирующие виды вредителей и наиболее распространенные в городских насаждениях заболевания (бактериальная водянка, опенок) характерны для региона в целом. Отсутствуют или имеют очень низкую плотность популяций некоторые широко распространенные виды вредителей из сем. *Gracillariidae*, как автохтонные, так и инвазионные.

В парках с доминированием сосны и представляющих собой рефугиумы естественных лесных экосистем встречаются типичные для региона заболевания и вредители. Их размножение и распространение обусловлено факторами, характерными для городской среды. Наибольшую опасность для этих насаждений представляют сосновые лубоеды, корневая губка, опенок и сосновая губка.

Список литературы

- [1] Бялт В.В., Фирсов Г.А., Бялт А.В., Орлова Л.В. Культурная флора г. Санкт-Петербурга (Россия) и ее анализ // Вестник Оренбургского государственного педагогического университета, 2019. № 2 (30). С. 11–103.
- [2] Варлыгина Т.И., Головкин Б.Н., Киселева К.В., Майоров С.Р., Немченко Э.П., Новиков В.С., Швецов А.Н., Щербаков А.В. Флора Москвы. Департамент природопользования и охраны окружающей среды города Москвы. М.: Голден Би, 2007. 512 с.
- [3] Майоров С.Р., Бочкин В.Д., Насимович Ю.А., Щербаков А.В. Адвентивная флора Москвы и Московской области. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2012. 412 с.
- [4] Кругляк В.В. Адаптивные системы озеленения природного каркаса города Воронежа // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 2. С. 64–72. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-2-64-72
- [5] Фирсов Г.А., Егоров А.А., Фадеева И.В., Бялт В.В. К вопросу об ассортименте древесных растений парков Санкт-Петербурга // Hortus Botanicus, 2010. Т. 4. С. 1–14.
- [6] Состояние зеленых насаждений в Москве. Аналитический доклад. М.: Прима-М, 1998–2005. Вып. 1–5, 7, 8.

- [7] Белова Н.К. Распространение главнейших вредителей древесных пород в декоративных посадках г. Москвы и окрестностях // Повышение продуктивности лесов и улучшение ведения лесного хозяйства. Вып. 120. М.: МЛТИ, 1981. С. 132–139.
- [8] Беднова О.В. Охридский минер *Cameraria ohridella* Deschka&Dimic: особенности инвазионных очагов и перспективы биологического контроля численности // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 1. С. 5–16. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-1-5-16
- [9] Буй Динь Дык, Денисова Н.В., Барышникова С.В., Шевченко С.В., Селиховкин А.В. Актуальные изменения видового состава и плотности популяций насекомых-филлофагов в Санкт-Петербурге // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2020. Вып. 230. С. 73–99.
- [10] Дендробиотные насекомые зеленых насаждений г. Москвы / под ред. Н.П. Кривошеина, В.Р. Стриганова. М.: Наука, 1992. 119 с.
- [11] Селиховкин А.В., Денисова Н.В., Тимофеева Ю.А. Динамика плотности популяций минирующих микрочешуекрылых в Санкт-Петербурге // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. Вып. 200, 2012. С. 148–159.
- [12] Селиховкин А.В., Ахматович Н.А., Варенцова Е.Ю., Поповичев Б.Г. Размножение кородея-типографа и других дендропатогенных организмов в лесах Карельского перешейка // Лесоведение, 2018. № 6. С. 426–433.
- [13] Тарасова О.В., Ковалев А.В., Суховольский В.Г., Хлебопрос Р.Г. Насекомые-филлофаги зеленых насаждений городов: видовой состав и особенности динамики численности. Новосибирск: Наука, 2004. 178 с.
- [14] Юркина Е.В., Пестов С.В. Разнообразие и характеристика насекомых в условиях крупных городов северных территорий России (на примере г. Сыктывкара). Сыктывкар: Изд-во СЛИ, 2015. 192 с.
- [15] Herrmann D.L., Pearse I.S., Baty J.H. Drivers of specialist herbivore diversity across 10 cities // Landsc. Urban Plan., 2012, v. 108, pp. 123–130. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.08.007>
- [16] Крутов В.И., Минкевич И.И. Грибные болезни древесных пород. Петрозаводск: Изд-во Карельского научного центра РАН, 2002. 196 с.
- [17] Алексеев А.С., Ходачек О.А., Селиховкин А.В. Анализ факторов ослабления хвойных древостоев в рекреационных насаждениях // Биосфера, 2019. Т. 11. № 1. С. 48–61.
- [18] Schmitt L., Burghardt K.T. Urbanization as a disrupter and facilitator of insect herbivore behaviors and life cycles // Current Opinion in Insect Science, 2021, v. 45, pp. 97–105
- [19] Unterweger P.A., Klammer J., Unger M., Betz O. Insect hibernation on urban green land: a winter-adapted mowing regime as a management tool for insect conservation // BioRisk, 2018, v. 13, pp. 1–29. <https://doi.org/10.3897/biorisk.13.22316>
- [20] Селиховкин А.В. Инвазионные вредители и патогены древесных растений в Санкт-Петербурге // Фитосанитария. Карантин растений, 2024. № S1 (18). С. 70–71.
- [21] Селиховкин А.В. Преобразование комплексов микрочешуекрылых под влиянием загрязнения воздуха: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. СПбГУ, 1994, 32 с.
- [22] Селиховкин А.В. Динамика плотности популяций микрочешуекрылых в зонах промышленного загрязнения воздуха // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 1995. Вып. 3 (161). С. 28–41.
- [23] Селиховкин А.В. Динамика плотности популяций минирующих микрочешуекрылых в зонах промышленного загрязнения воздуха // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 1996. Вып. 4 (162). С. 26–38.
- [24] Официальный сайт города Набережные Челны. URL: nabchelny.ru/?ysclid=lev7lxyxdq929877029 (дата обращения 15.01.2024).
- [25] Набережные Челны. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Набережные Челны](https://ru.wikipedia.org/wiki/Набережные_Челны) (дата обращения 15.01.2024)
- [26] Набережные Челны. URL: [https://www.google.com/maps/Набережные Челны](https://www.google.com/maps/Набережные_Челны) (дата обращения 15.01.2024)
- [27] Маслов А.Д. Учет стволовых вредителей леса (раздел 8) // Методы мониторинга вредителей и болезней леса / под ред. В.К. Тузова. М.: ВНИИЛМ, 2004. С. 87–92.
- [28] Журавлев И.И., Соколов Д.В. Лесная фитопатология. М.: Лесная пром-сть, 1969. 367с.
- [29] Ролл-Хансен Ф., Ролл-Хансен Х. Болезни лесных деревьев: монография / под ред. В.А. Соловьева. СПб: Изд-во СПб ЛТА, 1998. 120 с.
- [30] Селиховкин А.В. Могут ли вспышки массового размножения насекомых-дендрофагов оказать существенное влияние на состояние биосферы? // Биосфера, 2009. Т. 1. № 1. С. 72–81.
- [31] Селиховкин А.В., Барышникова С.В., Мамаев Н.А., Мартирова М.Б. Микрочешуекрылые — доминирующая группа насекомых-филлофагов в Санкт-Петербурге и окрестностях // XVI съезд Русского энтомологического общества. Тезисы докладов. Москва, 22–26 августа 2022 г. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2022. С. 137 DOI: 10.5281/zenodo.6976546
- [32] Селиховкин А.В., Варенцова Е.Ю., Поповичев Б.Г. Сплошные санитарные рубки как метод контроля плотности популяций стволовых вредителей и распространения дендропатогенных организмов в современных условиях на примере Ленинградской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2017. Вып. 220. С. 186–199.
- [33] Жуков А.М., Гниненко Ю.И., Жуков П.Д. Опасные малоизученные болезни хвойных пород в лесах России. Пушкино: ВНИИЛМ, 2013. 128 с.
- [34] Гибадулина И.И., Масленникова Н.Н. Современное состояние зеленых насаждений г. Набережные Челны // II Междунар. науч.-практ. конф. «Инновационные направления интеграции науки, образования и производства»: сб. тез. докладов, Керчь, 19–23 мая 2021 г. / под ред. Е.П. Масюткина, Керчь: Изд-во Керченского государственного морского технологического университета, 2021. С. 632–635.
- [35] Барышникова С.В. Gracillariidae // Каталог чешуекрылых (Lepidoptera) России / под ред С.Ю. Синева. СПб.: Изд-во Зоологического института РАН, 2019. С. 36–43.
- [36] Musolin D.L., Kirichenko N.I., Karpun N.N., Ak-senenko E.V., Golub V.B., Kerchev I.A., Mandelsh-tam M.Yu., Vasaitis R., Volkovitsh M.G., Zhuravleva E.N.,

- Selikhovkin A.V. Invasive and Emerging Insect Pests in Forests and Urban Plantations of Russia: Origin, Pathways, Damage, and Management // *Forests*, 2022, v. 13, p. 521.
- [37] Крутов В.И. Причины эпифитотий некоторых грибных болезней древесных пород на Европейском Севере // II Всесоюз. науч.-техн. конф. «Охрана лесных экосистем и рациональное использование лесных ресурсов»: тезисы докладов, Москва, 01 января – 31 декабря 1991 г. М.: МЛТИ., 1991. Ч. I. С. 141–142.
- [38] Петрова Г.А., Ятманова Н.М., Сингатуллин И.К. Оценка состояния сосняков в ГКУ «Пригородное лесничество» Республики Татарстан // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: Материалы XX Междунар. науч.-техн. конф., Вологда, 6 декабря 2022 г. Вологда: Изд-во ВоГУ, 2022. С. 84–88.

Сведения об авторах

Селиховкин Андрей Витимович✉ — д-р биол. наук, зав. кафедрой защиты леса, древесиноведения и охотоведения, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», a.selikhovkin@mail.ru

Варенцова Елена Юрьевна — канд. биол. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», varentsova.elena@mail.ru

Мусин Харис Гайнутдинович — д-р с.-х. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет», haris.musin@rambler.ru

Потокин Александр Федорович — канд. биол. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», alex221957@mail.ru

Мамаев Никита Андреевич — аспирант, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», mamaevld@bk.ru

Мартирова Мария Борисовна — аспирант, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», masha2340350@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.04.2024.

Одобрено после рецензирования 12.11.2024.

Принята к публикации 04.02.2025.

PECULIARITIES OF PEST AND PATHOGEN COMPLEXES IN URBAN PLANTATIONS OF NABEREZHNYE CHELNY CITY

A.V. Selikhovkin¹✉, E.Yu. Varentsova¹, A.F. Potokin¹,
H.G. Musin², N.A. Mamaev¹, M.B. Martirova¹

¹Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, 5, Institutskiy per., 194021, Saint Petersburg, Russia

²Kazan State Agrarian University, 65, K. Marksa st., 420015, Kazan, Republic of Tatarstan, Russia

a.selikhovkin@mail.ru

In large cities, especially those created several centuries ago, a specific and very stable complex of pests and pathogens has been formed, which is gradually replenished with invasive species. The structure and dynamics of the species composition of insect pests and phytopathogenic organisms of such plantations have been studied quite well, but there are few such publications for the newly created green landscapes of young cities. In order to analyze the dominant species of pests and pathogens of woody plants in Naberezhnye Chelny, in the first half of November 2022, a survey of all categories of urban plantations was conducted. In the process of work, the species composition of woody plants, their condition, the presence of pathogenic formations and damage by pests were determined. The main attention was paid to organisms that can lead to death or significantly worsen the condition and aesthetic value of trees and shrubs. The types of diseases and their pathogens were determined by characteristic direct and indirect signs. Generally accepted methods have been used to determine the species composition of dominant pest species and groups and to estimate the population density of stem pests. During the survey of green spaces, 108 plant species belonging to 24 families were identified, which are relatively evenly distributed across the city districts. The species composition and prevalence of pests and diseases of woody plants in Naberezhnye Chelny are very specific. The dominant pest species are typical for urban plantations in the region, but a number of widespread autochthonous and invasive pest species and pathogens are absent. The most common diseases in plantings (bacterial drowsy and root rot from *Armillaria*) are characteristic of the region as a whole. In parks dominated by pine, *Tomicus* sp., root sponge, *Armillaria* and pine sponge are the most dangerous.

Keywords: urban plantations, pests and pathogens, arboreal and shrubby flora, dominant species

Suggested citation: Selikhovkin A.V., Varentsova E.Yu., Potokin A.F., Musin Kh.G., Mamaev N.A., Martirova M.B. *Osobennosti kompleksov vreditel'ey i patogenov v gorodskikh nasazhdeniyakh g. Naberezhnye Chelny* [Peculiarities of pest and pathogen complexes in urban plantations of Naberezhnye Chelny city]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 2, pp. 55–69. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-2-55-69

References

- [1] Byalt V.V., Firsov G.A., Byalt A.V., Orlova L.V. *Kul'turnaya flora g. Sankt-Peterburga (Rossiya) i ee analiz* [Cultural flora of St. Petersburg (Russia) and its analysis]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta* [Bulletin of the Orenburg State Pedagogical University], 2019, no. 2 (30), pp. 11–103.
- [2] Varlygina T.I., Golovkin B.N., Kiseleva K.V., Mayorov S.R., Nemchenko E.P., Novikov V.S., Shvetsov A.N., Shcherbakov A.V. *Flora Moskvy. Departament prirodnopol'zovaniya i okhrany okruzhayushchey sredy goroda Moskvy* [Flora of Moscow. Department of Nature Management and Environmental Protection of Moscow]. Moscow: Golden Bee, 2007, 512 p.
- [3] Mayorov S.R., Bochkov V.D., Nasimovich Yu.A., Shcherbakov A.V. *Adventivnaya flora Moskvy i Moskovskoy oblasti* [Advent flora of Moscow and the Moscow region]. Moscow: Society of scientific publications of the KMK, 2012, 412 p.
- [4] Kruglyak V.V. *Adaptivnyye sistemy ozeleneniya prirodnogo karkasa goroda Voronezha* [Adaptive landscape systems for natural frame in Voronezh]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 2, pp. 64–72. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-2-64-72
- [5] Firsov G.A., Egorov A.A., Fadeeva I.V., Byalt V.V. *K voprosu ob assortimente drevesnykh rasteniy parkov Sankt-Peterburga* [On the assortment of woody plants in the parks of St. Petersburg]. *Hortus Botanicus*, 2010, v. 4, pp. 1–14.
- [6] *Sostoyanie zelenykh nasazhdeniy v Moskve. Analiticheskiy doklad* [The state of green areas in Moscow. Analytical report]. Moscow: Prima-M, 1998–2005, iss. 1–5, 7, 8.
- [7] Belova N.K. *Rasprostraneniye glavnayshikh vreditel'ey drevesnykh porod v dekorativnykh posadkakh g. Moskvy i okrestnostyakh* [Distribution of the main pests of trees in ornamental plantings d. Moscow and its surroundings]. *Povysheniye produktivnosti lesov i uluchsheniye vedeniya lesnogo khozyaystva* [Increasing the productivity of forests and improving the management of forestry] Moscow: MLTI, 1981, iss. 120, pp. 132–139.
- [8] Bednova O.V. *Okhridskiy minor Cameraria ohridella Deschka & Dimic: osobennosti invazionnykh ochagov i perspektivy biologicheskogo kontrolya* [Ohrid miner *Cameraria ohridella* Deschka & Dimic: features of invasive foci and perspectives of biological control]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 1, pp. 5–16. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-1-5-16

- [9] Buy Din' Dyk, Denisova N.V., Baryshnikova S.V., Shevchenko S.V., Selikhovkin A.V. *Aktual'nye izmeneniya vidovogo sostava i plotnosti populyatsiy nasekomykh-fillofagov v Sankt-Peterburge* [Actual changes in the species composition and density of phyllophagous insect populations in St. Petersburg]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [News of the St. Petersburg Forestry Academy], 2020, iss. 230, pp. 73–99.
- [10] *Dendrobiotnye nasekomye zelenykh nasazhdeniy g. Moskvy* [Dendrobiotic insects of green stands d. Moscow]. Ed. N.P. Krivosheina, V.R. Striganova. Moscow: Nauka, 1992, 119 p.
- [11] Selikhovkin A.V., Denisova N.V., Timofeeva Yu.A. *Dinamika plotnosti populyatsiy miniruyushchikh mikrocheshuekrylykh v Sankt-Peterburge* [Density dynamics of mining microscale populations in St. Petersburg]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [News of the St. Petersburg Forestry Academy. Issue. 200], 2012, pp. 148–159.
- [12] Selikhovkin A.V., Akhmatovich N.A., Varentsova E.Yu., Popovichev B.G. *Razmnozhenie koroeda-tipografa i drugikh dendropatogennykh organizmov v lesakh Karel'skogo peresheyka* [Reproduction of the bark beetle-typographer and other dendropathogenic organisms in the forests of the Karelian Isthmus]. *Lesovedenie* [Forestry], 2018, no. 6, pp. 426–433.
- [13] Tarasova O.V., Kovalev A.V., Sukhovol'skiy V.G., Khlebopros R.G. *Nasekomye-fillofagi zelenykh nasazhdeniy gorodov: vidovoy sostav i osobennosti dinamiki chislennosti* [Insect phyllophages of urban greenspaces: species composition and features of population dynamics]. Novosibirsk: Nauka, 2004, 178 p.
- [14] Yurkina E.V., Pestov S.V. *Raznoobrazie i kharakteristika nasekomykh v usloviyakh krupnykh gorodov severnykh territoriy Rossii (na primere g. Syktyvkara)* [Diversity and characteristics of insects in the conditions of large cities of the northern territories of Russia (on the example of Syktyvkar)]. Syktyvkar: SLI, 2015, 192 p.
- [15] Herrmann D.L., Pearse I.S., Baty J.H. Drivers of specialist herbivore diversity across 10 cities. *Landsc. Urban Plan.*, 2012, v. 108, pp. 123–130. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.08.007>
- [16] Krutov V.I., Minkevich I.I. *Gribnye bolezni drevesnykh porod* [Fungal diseases of wood]. Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2002, 196 p.
- [17] Alekseev A.S., Khodachek O.A., Selikhovkin A.V. *Analiz faktorov oslableniya khvoynykh drevostoev v rekreatsionnykh nasazhdeniyakh* [Analysis of conifer attenuation factors in recreational stands]. *Biosfera* [Biosphere], 2019, v. 11, no. 1, pp. 48–61.
- [18] Schmitt L., Burghardt K.T. Urbanization as a disrupter and facilitator of insect herbivore behaviors and life cycles. *Current Opinion in Insect Science*, 2021, v. 45, pp. 97–105
- [19] Unterweger P.A., Klammer J., Unger M., Betz O. Insect hibernation on urban green land: a winter-adapted mowing regime as a management tool for insect conservation. *BioRisk*, 2018, v. 13, pp. 1–29. <https://doi.org/10.3897/biorisk.13.22316>
- [20] Selikhovkin A.V. *Invazionnye vrediteli i patogeny drevesnykh rasteniy v Sankt-Peterburge* [Invasive pests and pathogens of woody plants in St. Petersburg]. *Fitosanitariya. Karantin rasteniy* [Phytopathology. Plant Quarantine], 2024, no. S1 (18), pp. 70–71.
- [21] Selikhovkin A.V. *Preobrazovanie kompleksov mikrocheshuekrylykh pod vliyaniem zagryazneniya vozdukha* [Transformation of microscale complexes under air pollution]. Diss. Cand. Sci. (Biol.). SPbGU, 1994, 32 p.
- [22] Selikhovkin A.V. *Dinamika plotnosti populyatsiy mikrocheshuekrylykh v zonakh promyshlennogo zagryazneniya vozdukha* [Dynamics of the density of microscale populations in zones of industrial air pollution]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Izvestia St. Petersburg Forestry Academy], 1995, iss. 3 (161), pp. 28–41.
- [23] Selikhovkin A.V. *Dinamika plotnosti populyatsiy miniruyushchikh mikrocheshuekrylykh v zonakh promyshlennogo zagryazneniya vozdukha* [Dynamics of density of populations of mining microscale insects in zones of industrial air pollution]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Izvestiya St. Petersburg Lesotechnical Academy], 1996, v. 4 (162), pp. 26–38.
- [24] *Ofitsial'nyy sayt goroda Naberezhnye Chelny* [Official website of the city of Naberezhnye Chelny]. Available at: nabchelny.ru/?ysclid=lev7lxyxdq929877029 (accessed 15.01.2024).
- [25] *Naberezhnye Chelny* [Naberezhnye Chelny]. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Naberezhnye_Chelny (accessed 15.01.2024)
- [26] *Naberezhnye Chelny* [Naberezhnye Chelny]. Available at: https://www.google.com/maps/Naberezhnye_Chelny (accessed 15.01.2024)
- [27] Maslov A.D. *Uchet stvolovykh vreditel'ev lesa (razdel 8)* [Accounting for forest trunk pests (section 8)]. *Metody monitoringa vreditel'ev i bolezney lesa* [Methods of monitoring forest pests and diseases]. Ed. V.K. Tuzova. Moscow: VNIILM, 2004, pp. 87–92.
- [28] Zhuravlev I.I., Sokolov D.V. *Lesnaya fitopatologiya* [Forest phytopathology]. Moscow: Lesnaya prom-st, 1969, 367 p.
- [29] Roll-Hansen F., Roll-Hansen H. *Bolezni lesnykh derev'ev* [Diseases of forest trees]. Ed. V.A. Solovyova. St. Petersburg: SPB LTA, 1998, 120 p.
- [30] Selikhovkin A.V. *Mogut li vspyshki massovogo razmnozheniya nasekomykh-dendrofagov okazat' sushchestvennoe vliyanie na sostoyanie biosfery?* [Could outbreaks of dendrophage insect mass reproduction have a substantial impact on the state of the biosphere?]. *Biosfera* [Biosphere], 2009, v. 1, no. 1, pp. 72–81.
- [31] Selikhovkin A.V., Baryshnikova S.V., Mamaev N.A., Martirova M.B. *Mikrocheshuekrylye — dominiruyushchaya grupa nasekomykh-fillofagov v Sankt-Peterburge i okrestnostyakh* [Microscale winged – the dominant group of insect-phylophagous in St. Petersburg and its surroundings]. XVI s'ezd Russkogo entomologicheskogo obshchestva. Tezisy dokladov [XVI Congress of the Russian Entomological Society. Abstracts of reports]. Moscow, 22–26 August 2022. Moscow: T-vo nauchnykh edition of CMC, 2022, p. 137. DOI: 10.5281/zenodo.6976546

- [32] Selikhovkin A.V., Varentsova E.Yu., Popovichev B.G. *Sploshnye sanitarnye rubki kak metod kontrolya plotnosti populyatsiy stvolovykh vreditel'ey i rasprostraneniya dendropatogennykh organizmov v sovremennykh usloviyakh na primere Leningradskoy oblasti* [Continuous sanitary felling as a method of controlling the density of populations of stem pests and the spread of dendropathogenic organisms in modern conditions on the example of the Leningrad region]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Izvestia St. Petersburg Forestry Academy], 2017, iss. 220, pp. 186–199.
- [33] Zhukov A.M., Gninenko Yu.I., Zhukov P.D. *Opasnye maloizuchennyye bolezni khvoynykh porod v lesakh Rossii* [Dangerous little-studied diseases of conifers in the forests of Russia]. Pushkin: VNIILM, 2013, 128 p.
- [34] Gibadulina I.I., Maslennikova N.N. *Sovremennoe sostoyanie zelenykh nasazhdeniy g. Naberezhnye Chelny* [Current state of green spaces in Naberezhnye Chelny]. II Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Innovatsionnye napravleniya integratsii nauki, obrazovaniya i proizvodstva»: sb. tezisov dokladov [II International Scientific and Practical Conference «Innovative Directions of Integration of Science, Education and Production»: collection of abstracts of reports]. Ed. E.P. Masyutkina, Kerch, May 19–23, 2021. Kerch: Kerch State Marine Technological University, 2021, pp. 632–635.
- [35] Baryshnikova S.V. *Gracillariidae* [Gracillariidae. Catalog of Lepidoptera (Lepidoptera) of Russia]. Ed. S.Yu. Sinev. St. Petersburg: Zoological Institute of the Russian Academy of Sciences, 2019, pp. 36–43.
- [36] Musolin D.L., Kirichenko N.I., Karpun N.N., Aksenenko E.V., Golub V.B., Kerchev I.A., Mandelshtam M.Yu., Vasaitis R., Volkovitch M.G., Zhuravleva E.N., Selikhovkin A.V. *Invasive and Emerging Insect Pests in Forests and Urban Plantations of Russia: Origin, Pathways, Damage, and Management*. Forests, 2022, v. 13, p. 521.
- [37] Krutov V.I. *Prichiny epifitotiy nekotorykh gribnykh bolezney drevesnykh porod na Evropeyskom Severe* [Causes of epiphytoses of some fungal diseases of tree species in the European North]. II Vsesoyuznaya nauchno-tekhnicheskaya konf. «Okhrana lesnykh ekosistem i ratsional'noe ispol'zovanie lesnykh resursov»: tezisy dokladov [II All-Union scientific and technical conf. «Protection of forest ecosystems and rational use of forest resources», Moscow, January 1 – December 31, 1991. Moscow: MLTI, 1991, part I, pp. 141–142.
- [38] Petrova G.A., Yatmanova N.M., Singatullin I.K. *Otsenka sostoyaniya sosnyakov v GKU «Prigorodnoe lesnichestvo» Respubliki Tatarstan* [Assessment of the condition of pine forests in the State Institution «Prigorodnoye Forestry» of the Republic of Tatarstan]. Aktual'nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa: mater. XX Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Actual problems of development of the forest complex: materials. XX International scientific and technical conference], Vologda, December 6, 2022. Vologda: Vologda State University, 2022, pp. 84–88.

Authors' information

Selikhovkin Andrey Vitimovich✉ — Dr. Sci. (Biology), Head of the Department of Forest Protection, Wood Sciences and Game Management of the St. Petersburg State Technical University named after S.M. Kirov, a.selikhovkin@mail.ru

Varentsova Elena Yur'evna — Cand. Sci. (Biology), Associate Professor of the Department of Forest Protection, Wood Sciences and Game Management, of the St. Petersburg State Technical University named after S.M. Kirov, varentsova.elena@mail.ru

Musin Kharis Gaynutdinovich — Dr. Sci. (Agriculture), Professor of the Kazan Agrarian University, haris.musin@rambler.ru

Potokin Aleksandr Fedorovich — Cand. Sci. (Biology), Associate Professor of the Department of Botany and Dendrology of the St. Petersburg State Technical University named after S.M. Kirov, alex221957@mail.ru

Mamaev Nikita Andreevich — pg. of the St. Petersburg State Technical University named after S.M. Kirov, Russia, mamaevld@bk.ru

Martirova Mariya Borisovna — pg. of the St. Petersburg State Technical University named after S.M. Kirov, masha2340350@yandex.ru

Received 23.04.2024.

Approved after review 12.11.2024.

Accepted for publication 04.02.2025.

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

ВЛИЯНИЕ БОРЬБЫ С ФИТОПАТОГЕНАМИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОРБЦИОННО-СТИМУЛИРУЮЩИХ ПРЕПАРАТОВ НА ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУРАХ

Г.Н.Федотов¹✉, Т.А. Грачева¹, И.В. Горепекин^{1, 2}, Ю.П. Батырев³

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

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

³МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

gennadiy.fedotov@gmail.com

Проведено изучение эффективности одного из классов стимуляторов — сорбционно-стимулирующих препаратов, а также разработаны подходы к созданию эффективных препаратов-стимуляторов. Объектами исследования выступали семена сортов яровой и озимой пшениц, ярового ячменя и озимой ржи. Испытания проводили на дерново-подзолистой почве, изменяя ее аллелотоксичность за счет пробоподготовки. Фиксируемым показателем при оценке аллелотоксичности, а также эффективности действия препарата выступала суммарная длина проростков семян. Определение микробиологического состава почв проводилось при помощи прямой люминесцентной микроскопии и посева на питательные среды. В ходе экспериментов установлено, что повышение аллелотоксичности почвенных образцов приводило к заметному снижению эффектов стимуляции препаратом для семян яровой пшеницы. При добавлении в состав препарата сахарозы, способствующей развитию микроорганизмов, и увеличении дозы использования состава в 1,5 раза эффекты стимуляции продолжили убывать, достигая значений ингибирования для некоторых сортов. На яровом ячмене повышение дозы препарата, напротив, приводило к росту его эффективности. Однако увеличение значений агрофона до избыточного уровня, при котором развиваются грибы-фитопатогены, показало, что состав с сахарозой более не стимулирует, а угнетает прорастание семян и развитие проростков ячменя. На основе полученных данных сделан вывод о том, что аллелотоксины могут поступать в семена и развивающиеся растения не только из почв, но и из фитопатогенов, поэтому использование стимуляторов без ограничения развития фитопатогенов не позволяет решить проблему защиты семян от аллелотоксинов. Для этого предложено использовать препарат совместно с фунгицидами. Лабораторные эксперименты подтвердили правильность такого подхода — применение состава совместно с фунгицидами во всех случаях оказывает стимулирующее действие на изученных нами сортах и культурах зерновых.

Ключевые слова: аллелотоксичность почв, стимуляция семян, предпосевная обработка семян, фунгициды, ретардантный эффект фунгицидов

Ссылка для цитирования: Федотов Г.Н., Грачева Т.А., Горепекин И.В., Батырев Ю.П. Влияние борьбы с фитопатогенами на эффективность использования сорбционно-стимулирующих препаратов на зерновых культурах // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 2. С. 70–81.
DOI: 10.18698/2542-1468-2025-2-70-81

Многочисленные попытки стимуляции прорастания семян путем их предпосевной обработки широко освещены в литературе [1, 2]. Известны сотни химических соединений и препаратов, ускоряющих прорастание семян или защищающих их от болезней и вредителей [3–5]. Эти соединения отличаются по химическому составу и природе биологического действия, поэтому до сих пор нет единой теоретической базы, с помощью которой можно было бы объяснить их влияние на семена. Среди такого типа

соединений есть протравители — вещества, обеспечивающие защиту семян от патогенной микрофлоры и вредителей [3, 6].

Химические соединения и препараты применяют также для ускорения прорастания семян. Например, в литературе [4] описан нанопрепарат на основе железа, повысивший урожайность кукурузы на 14,3 % при обработке этим препаратом ее семян. Кроме того, в зернах кукурузы по сравнению с контрольным образцом содержание витамина А возросло на 137 % [4]. Другой пример описывает использование составов на основе кремния для обработки семян

ярового ячменя [5], что позволяет усилить устойчивость этого растения к действию засухи и повысить его продуктивность на 17...21 %. Кроме того, благодаря применению этих соединений в семенах также возросло среднее содержание фосфора [5].

Основной недостаток многих подобных химических составов заключается в разработке стимулирующих составов с помощью эмпирических методов, а механизм действия носит предположительный характер. В частности, в приведенных выше исследованиях стимуляцию семян рассматривали не как систему во всем ее многообразии, включающую почву, почвенные микроорганизмы (эндофиты, микоризу, патогены), семена или растения и препарат стимулятор, а пытались подобрать вещества, которые в отрыве от почвы оказывают активирующее воздействие на биохимические процессы, протекающие в семенах. По этой причине из рассмотрения полностью исключалось такое важнейшее почвенное свойство, как аллелотоксичность [7–15], угнетающе воздействующее на прорастание семян и развитие из них растений и возможно, влияющее на развитие эндофитов [16, 17], микориз зерновых [18–20] и активизирующее фитопатогены [11]. Фитопатогены к тому же способны производить аллелотоксины, ослабляющие защитную реакцию растения-хозяина и ассоциированных с ним видов микроорганизмов. К идентифицированным родам, производящим аллелотоксины, относят грибы следующих родов: *Microcyclospora*, *Fusarium*, *Sclerotinia*, *Myrothecium*, *Trichothecium*, *Peltaster*, *Spicellum*, *Alternaria*, *Stachybotrys*, *Isaria*, *Trichoderma* [21–24].

При этом для рода *Alternaria* известно не менее 70 видов токсинов, 20 из которых являются специфическими для растения-хозяина [23]. Отметим, что грибы не только выделяют микотоксины, но и обладают способностью к детоксикации фитотоксинов, формирующих защитную систему растения. Так, семейство Brassicaceae для защиты от патогенов и травоядных насекомых производит изотиоцианаты. Однако эти защитные вещества метаболизируются грибом *Sclerotinia sclerotiorum* путем конъюгации с глутатионом и гидролизом до аминов [22]. В результате защитные вещества оказывают противоположный эффект: вирулентность гриба *Sclerotinia sclerotiorum* повышается.

Из изложенного выше следует, что препараты для обработки семян должны оказывать прежде всего положительное действие на растения на фоне влияния мощного ингибирующего

фактора — аллелотоксичности почв, что не могло не отразиться на получаемых исследователями результатах. Также не учитывали возможность взаимодействия микроорганизмов почв с используемыми для стимуляции составами, равно как и возможность уменьшения концентрации аллелотоксинов микроорганизмами, которые, как отмечено в литературе [25–27], используют токсины в качестве источников углерода.

Кроме того, при разработке стимуляторов следует учитывать различный баланс гормонов в семенах растений, поскольку при их недостатке семена могут поглощать биологически активные вещества (БАВ) из почвы.

Таким образом, разработка стимуляторов семян представляет собой очень сложный процесс, в котором достаточно трудно выделить главный фактор.

В некоторых работах [28–30] для повышения эффективности предпосевной обработки семян предлагается использовать сорбционно-стимулирующие препараты, которые совместно с БАВ содержат сорбенты, способные поглощать аллелотоксины и снижать их негативное воздействие на семена и вырастающие из них растения, на эндофиты, микоризу и на активизацию фитопатогенов [11].

Цель работы

Цель работы — изучение эффективности сорбционно-стимулирующих препаратов на культурах зерновых и разработка подходов, позволяющих создать универсальный препарат, способный оказывать стимулирующее действие на семена различных зерновых культур при их предпосевной обработке.

Объекты и методы исследования

Исследования проводились на следующих культурах зерновых:

- яровая пшеница (*Triticum aestivum* L.) сортов Злата, Любава, Агата, Лиза, Эстер, Гранни;
- яровой ячмень (*Hordeum vulgare* L.) сортов Яромир, Златояр, Владимир, Эльф, Московский-86;
- озимая пшеница (*Triticum aestivum* L.) сортов Стрелецкая-12, Московская 56, Немчиновская-17, Немчиновская-85, Ермак;
- озимая рожь (*Secale cereale* L.) сортов Московская-12 и Татьяна.

Были также использованы образцы (согласно Классификации почв СССР 1977 года)

агродерново-глубокоподзолистой легкосуглинистой на водно-ледниковых (древнеозерных) отложениях почвы, подстилаемой с глубины 92 см бескарбонатными лёссовидными (покровными) суглинками (окрестности поймы р. Яхрома, Московская обл.), с содержанием азота — 0,14 %, калия — 194 мг/кг, фосфора — 290 мг/кг.

Для приготовления образцов почвы с избыточным агрофоном, соответствующим зоне стресса почвенных микроорганизмов [31], в исходную почву вносили раствор кристаллона универсального, повышая содержание питательных веществ в ~1,5 раза (азота — до 0,15 %, калия — до 310 мг/кг, фосфора — до 380 мг/кг).

Для защиты семян от аллелотоксинов применили сорбционный препарат, характеризующийся следующим соотношением компонентов:

- гумат калия из бурого угля — 10 г/л;
- бентонит кальция в концентрации — 40 г/л;
- автолизат пивных дрожжей — 12 г/л.

К сорбционному препарату добавляли следующие средства:

- гиббереллин 90%-й — 300 мг/л (производство Китай);
- полиэтиленгликоль с молекулярной массой 400 у. е. — 300 мг/л.

Этот 5-компонентный препарат назвали ССП-5 — сорбционно-стимулирующий препарат пятикомпонентный. При изготовлении 6-компонентного препарата (ССП-6) в препарат ССП-5 добавляли сахарозу в концентрации 8 г/л.

Также применяли фунгициды Фитоспорин-М и Ламадор в жидких формах в рекомендуемых для обработки семян концентрациях.

Семена обрабатывали из расчета 40 и 60 л рабочего раствора на 1 т семян.

Оценку аллелотоксичности почв проводили в результате химического анализа и биотестирования.

Определение аллелотоксичности почв с использованием химических методов анализа направлено на сбор данных о составе веществ в почве — как качественных, так и количественных. Несмотря на обширный объем информации, полученной в результате анализа, ее интерпретация была затруднена по некоторым причинам.

Во-первых, количество БАВ исчисляется тысячами [32]. Информацию о составе соединений в большинстве случаев можно получить при изучении вытяжек из растений или анализе выделений микроорганизмов [7, 11, 27]. Иден-

тификация всего разнообразия БАВ, выделяемых обитающими в почвах видами, затруднена вследствие ограничений приборно-инструментальной базы. Более того, предел обнаружения вещества и его действующая концентрация не всегда эквиваленты. В результате при наличии ингибирования выявить ответственные за него соединения не представляется возможным.

Во-вторых, аллелотоксины часто действуют в виде смеси веществ, которые могут усиливать или ослаблять взаимный суммарный эффект [33–35]. В некоторых случаях концентрация отдельных компонентов смеси бывает ниже порога ингибирования, при этом их совместное негативное воздействие может быть значительным [11, 35].

В-третьих, такие нетоксичные вещества, как сахара или нитрат-ионы способны усиливать отрицательное воздействие аллелотоксинов [11].

В-четвертых, в зависимости от концентрации одни и те же БАВ могут проявлять как ингибирующие (аллелотоксичные), так и стимулирующие эффекты [36].

Таким образом, даже если установлены концентрации всех известных в почвах веществ: аллелотоксинов, стимулирующих БАВ и нейтральных соединений, установить корреляцию между этими данными и аллелотоксичностью не представляется возможным вследствие их непрогнозируемого синергетического взаимодействия. В связи с этим для оценки суммарного эффекта смеси аллелотоксинов рекомендуется использовать методы биотестирования.

Оценку аллелотоксичности проводили путем сравнения длины проростков 7,5 г семян (~200 шт.) в песке с размером частиц 0,5...0,8 мм и в почве. Оценку развития семян в песке принимали за 100 %, относительно которых рассчитывали замедление или ускорение развития проростков. Длину проростков оценивали в соответствии с методом, описанным в работе [37].

Влияние стимулирующих препаратов на развитие семян изучали, сравнивая обработанные семена с необработанными.

Во всех экспериментах по биотестированию применяли шестикратную повторность и рассчитывали доверительные интервалы для 95%-го уровня значимости.

Для определения общей численности бактерий в почвенных образцах использовали метод прямой люминисцентной микроскопии после окрашивания препаратов суспензии почвы акридином оранжевым. Численность спор грибов и длину грибного мицелия также определяли после окрашивания почвенной суспензии акридином оранжевым [38].

Т а б л и ц а 1

Влияние обработки семян зерновых стимуляторами и фунгицидами на их прорастание
Effect of grain seeds treatment with stimulants and fungicides on their germination

Культура	Сорт	Аллелотоксичность (+23 %) ССП-5 (40 л/т)	Аллелотоксичность (-27 %) ССП-5 (40 л/т)	Аллелотоксичность (-27 %) ССП-6 (60 л/т)	Аллелотоксичность (-27 %) Фунгицид	Аллелотоксичность (-27 %) Фунгицид + ССП-5
Яровая пшеница	Лиза	56 ± 5	30 ± 3	80 ± 7	0 ± 2	33 ± 3
	Любава	32 ± 3	20 ± 2	-15 ± 2	-37 ± 4	37 ± 4
	Злата	33 ± 4	—	5 ± 2	-31 ± 3	33 ± 4
	Агата	4 ± 2	—	-23 ± 3	-25 ± 3	33 ± 4
	Эстер	3 ± 2	—	-10 ± 2	-5 ± 2	13 ± 2
	Гранни	—	—	—	8 ± 2	72 ± 6
Озимая пшеница	Московская-56	21 ± 2	—	19 ± 3	0 ± 2	17 ± 2
	Немчиновская-17	24 ± 3	—	26 ± 3	9 ± 2	26 ± 3
	Стрелецкая-12	—	—	—	19 ± 3	40 ± 4
	Ермак	—	—	—	-35 ± 4	111 ± 11
	Немчиновская-85	—	—	—	30 ± 5	100 ± 10
Яровой ячмень	Златояр	17 ± 2	—	19 ± 3	-49 ± 6	50 ± 6
	Эльф	-4 ± 2	—	31 ± 4	-58 ± 7	87 ± 10
	Яромир	25 ± 3	—	53 ± 5	-63 ± 8	92 ± 10
	Московский-86	31 ± 4	2 ± 2	24 ± 3	-50 ± 6	39 ± 4
	Владимир	28 ± 3	25 ± 3	27 ± 3	-43 ± 5	45 ± 5
Озимая рожь	Московская-12	15 ± 2	—	15 ± 2	-48 ± 5	71 ± 7
	Татьяна	15 ± 2	—	19 ± 2	-38 ± 4	53 ± 5

Примечание. Для пшеницы применяли биологический фунгицид «Фитоспорин-М» в жидкой форме, для ячменя и ржи использовали фунгицид «Ламадор», так как «Фитоспорин-М» не рекомендован для применения на этих культурах. Все средства защиты растений применяли при рекомендуемых концентрациях и нормах расходах.

Классическим методом посева на глюкозо-пептонно-дрожжевую среду определяли численность сапротрофных культивируемых бактерий. Таксономическую принадлежность бактерий определяли на основании фенотипических признаков: микроморфологии, особенностей жизненного цикла, наличия спор и плодовых тел, а также окраски по Граму (с дальнейшим тестом с 3%-м раствором КОН) [38, 39]. Характеристику структуры бактериального комплекса проводили, используя подходы, описанные в работе [39].

Результаты и обсуждение

Изучено влияние стимуляторов и фунгицидов на прорастание семян зерновых культур на дерново-подзолистой почве различной аллелотоксичности (табл. 1). Большая часть сортов положительно реагирует на обработку препаратом. Исключение составляет яровая пшеница сортов Агата и Эстер, а также яровой ячмень сорта Эльф. На этих вариантах опыта стимуляция не обнаружена. Однако повышение аллелотоксичности почвы (с +23 % до -27 %),

наблюдающееся при высушивании почвенных образцов до воздушно-сухого состояния с их последующим увлажнением до влажности, близкой к влажности исходной почвы приводило к уменьшению стимуляции яровой пшеницы, а иногда и ячменя (см. табл. 1).

Введение сахарозы в состав препарата и повышение его расхода в 1,5 раза: с 40 до 60 л на 1 т семян — позволило на яровой пшенице сорта Лиза увеличить эффективность применения состава с 30 до 80 %.

Использование ССП-6 для обработки яровой пшеницы (см. табл. 1) не дало результат, так как им стимулируются только семена сорта Лиза. При этом семена ярового ячменя всех сортов этим препаратом стимулируются достаточно хорошо (от 19 до 53 %). Также заметная стимуляция наблюдается для семян озимых пшеницы и ржи (см. табл. 1).

В результате проведенных исследований получены данные, по которым невозможно выделить главную причину складывающейся ситуации. По-видимому, изменение любого параметра непрогнозируемо изменяет эффект стимуляции семян. При этом получение положительных результатов для семян одного сорта

не гарантирует успешное применение препарата к семенам других сортов и культур.

Для уточнения природы происходящих процессов провели исследование действия стимуляторов на образцах почв с избыточным агрофоном, в которых аллелотоксичность выражалась сильнее [31]. Установлено, что стимуляция ярового ячменя составом ССП-6 обернулась угнетением прорастания семян (сорт Златояр с +19 до -24 %; сорт Яромир с +53 до -40 %; сорт Московский-86 с +24 до -15 %), т. е. избыточный уровень агрофона резко изменяет действие стимуляторов по ячменю. Отсюда возникла необходимость понять причину происходящего.

Предположительно, в основе всех наблюдаемых от действия стимуляторов эффектов лежат изменения состава микроорганизмов как почв, так и семян. Из ранее выполненных исследований [31] вытекает, что после избыточного внесения удобрений в почву начинается борьба между развивающимися микроорганизмами за органические питательные вещества, сопровождающаяся выделением в почву аллелотоксинов. Аллелотоксичность дерново-подзолистой почвы с избыточным агрофоном повышается на 17 % по сравнению с дерново-подзолистой почвой с высоким агрофоном. Увеличение аллелотоксичности при избыточном внесении удобрений в почву уже наблюдали ранее на дерново-подзолистых [31] и серых лесных почвах [40]. В этой борьбе побеждают и начинают доминировать фитопатогены [31]. В результате их количество в почвах с избыточным агрофоном становится большим по сравнению с почвой, характеризующейся высоким агрофоном. Использование сахарозы в ССП-6, по-видимому, активизирует развитие фитопатогенов, численность которых уже повышена, что и объясняет усиление замедления прорастания семян.

Для проверки данного предположения было проведено сравнительное микробиологическое исследование образцов дерново-подзолистой почвы с избыточным и высокими агрофоном (табл. 2–4).

Из полученных данных следует, что длина мицелия в образцах с высоким агрофоном снижается с 320 до 110 м/г, т. е. практически в 3 раза. Выявленная методом посева численность культивируемых грибов незначительно повышается в образцах дерново-подзолистой почвы с избыточным агрофоном. Численность бактерий в обоих образцах высокая: 2,9...3,1 млрд клеток/г.

Численность актиномицетов в данных образцах почвы невелика и изменяется от $0,8 \times 10^5$ в образце с избыточным агрофоном до $3,0 \times 10^5$ в образце

Т а б л и ц а 2

Общая численность бактерий и длина грибного мицелия в образцах дерново-подзолистой почвы

Total bacterial amount and floccus length in sod-podzolic soil samples

Агрофон почвы	Численность бактерий, млрд/г	Грибы (мицелий), м/г
Избыточный	2,9 ± 0,3	110 ± 11
Высокий	3,1 ± 0,3	320 ± 30

Т а б л и ц а 3

Численность грибов в образцах дерново-подзолистой почвы

Amount of fungi in sod-podzolic soil samples

Агрофон почвы	КОЕ × 10 ⁴ на 1 г
Избыточный	5,4 ± 0,5
Высокий	3,6 ± 0,3

Примечание. КОЕ — колониеобразующая единица.

Т а б л и ц а 4

Численность сапротрофных бактерий, культивируемых на глюкозо-пептонно-дрожжевой среде, в образцах дерново-подзолистой почвы

Amount of saprotrophic bacteria cultured on glucose-peptone-yeast medium in sod-podzol soil samples

Агрофон почвы	Бактерии, млн КОЕ/г	Актиномицеты × 10 ⁵ , КОЕ/г	Содержание актиномицетов относительно бактерий, %
Избыточный	0,7 ± 0,07	0,8 ± 0,1	10,9
Высокий	2,5 ± 0,3	3,0 ± 0,3	11,9

с высоким агрофоном. Таким образом, внесение избыточных доз минеральных удобрений ведет к снижению численности мицелиальных актинобактерий. При этом таксономическое разнообразие актиномицетов невелико, и они представлены родом *Streptomyces* секций *Imperfectus* и *Albus*.

Установлено, что в образцах с высоким агрофоном доминанты грибов представлены видами р. *Chaetomium*, *Trichoderma*, *Clonostachis*, *Acremonium murorum*. В образцах почв с избы-

**Оптимизация составов, используемых для стимулирующей
предпосевной обработки семян препаратов**

Optimisation of compositions used for stimulating pre-sowing seed treatment of preparations

Препараты и их компоненты	Возможные направления влияния	Управление влиянием	Примечания
Фунгициды	Ингибирование эндофитов, микоризы, фитопатогенов	Выбор фунгицидов	Фунгициды не должны влиять на микоризу и эндофиты
Сорбенты	Закрепление аллелотоксинов и биологически активных веществ	Выбор вида и концентрации сорбентов	Сорбенты не должны закреплять биологически активные вещества
Питательные вещества	Активизация эндофитов, микоризы, фитопатогенов	Выбор питательных веществ	Питательные вещества не должны стимулировать фитопатогены
Гормоны	Стимуляция семян растений	Выбор гормонов и их концентрация	Комплекс гормонов должен стимулировать семена

точным уровнем внесения минеральных удобрений идет сокращение разнообразия видов. Большую часть комплекса микромицетов составляют токсинообразующие грибы р. *Fusarium*, *Talaromyces flavus*, *Penicillium funicolosum*.

Эксперименты подтвердили выдвинутое нами предположение об увеличении содержания потенциальных фитопатогенов в почве с избыточным агрофоном. В этом случае добавление сахарозы к ССП-5 способно увеличивать активность фитопатогенов. Этим можно объяснить изменения эффекта для семян ярового ячменя со стимуляцией препаратом ССП-6 на образцах почв с высоким агрофоном на угнетение прорастания в образцах почв с избыточным агрофоном, т. е. аллелотоксины могут поступать в семена (растения) из почв и, что не учитывалось ранее — от фитопатогенов.

Аллелотоксины из почв, по-видимому, поступают в семена путем обменных реакций между выделениями растений и закрепленными в почвах веществами. В такой ситуации аллелотоксины могут поступать в растения (семена) только из почвы. Это поясняет следующий проведенный нами расчет. На обработку 7,5 г (~200 шт.) семян мы расходуем в виде суспензии 18 мг сухого препарата. Эти семена при проведении вегетационных опытов высевались в 20 кг почвы. Почвенные растворы, угнетающие растения, в пересчете на кумарин содержат 500...1000 мг/л аллелотоксинов [7]. Поскольку влажность почв составляла около 20 %, то в 20 кг почвы только в почвенном растворе должно содержаться 1500...4000 мг аллелотоксинов. Предположить, что 18 мг сорбционного состава смогут связать такое количество аллелотоксинов, достаточно сложно.

При свободном движении аллелотоксинов по почве необходимое количество сорбента должно быть увеличено на 3–4 порядка. Тем не менее применение 18 мг сорбционно-стимулирующего препарата показало свою эффективность.

Перекрытие канала поступления аллелотоксинов из почв путем обработки семян сорбционно-стимулирующими препаратами задачу защиты семян от аллелотоксинов полностью не решает. Без учета микробиологического фактора и контроля фитопатогенов разработать стимулятор и применять его для обработки семян в условиях сельскохозяйственного производства не удастся. Сорбционные стимуляторы смогут эффективно действовать только при их совместном использовании с фунгицидами, которые будут предотвращать развитие фитопатогенов и поступление из них аллелотоксинов в семена (растения). В связи с этим состав препарата-стимулятора тоже должен быть комплексным, а его компоненты должны удовлетворять определенным требованиям (табл. 5).

При разработке препарата-стимулятора следует принять во внимание, что аллелотоксины и фунгициды одновременно действуют на семена, эндофиты и микоризу [41–43], а также на фитопатогены. Как следствие, действие фунгицидов, которое повышает устойчивость растений к болезням, на начальном этапе после применения может оказывать как стимулирующее, так и ингибирующее действие. Это будет зависеть от того, что они будут в большей степени угнетать — семена и их симбионты или фитопатогены. Сложность происходящих в почвах с обработанными ССП и фунгицидами семенами процессов представлена в виде схемы (рисунок).

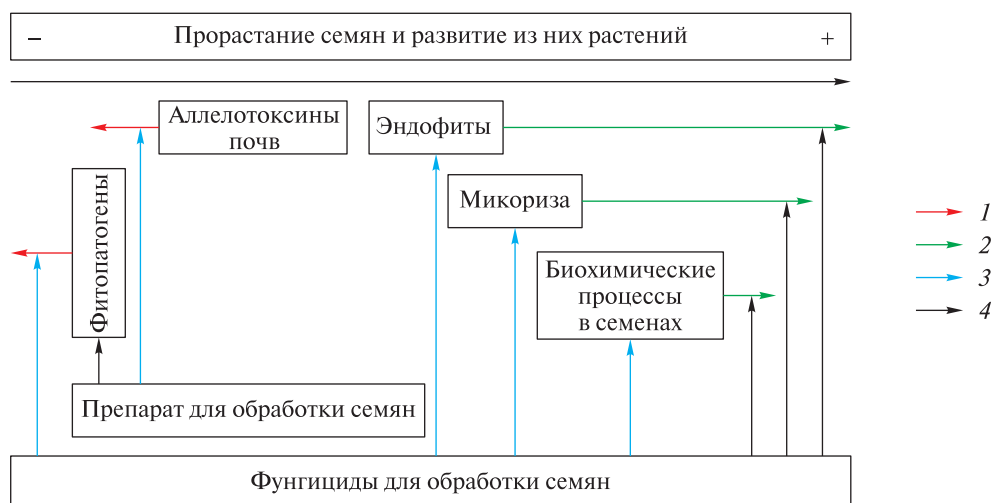


Схема взаимовлияния компонентов системы при прорастании семян в почвах: 1 — угнетающие воздействия на семена (растения); 2 — стимулирующие воздействия; 3 — воздействия, снижающие негативное влияние компонентов системы; 4 — воздействия, прямо или опосредованно усиливающие негативное влияние этих компонентов

Scheme of mutual influence of the system components during seed germination in soils: 1 — depressing effects on seeds (plants); 2 — stimulating effects; 3 — effects reducing the negative influence of the system components; 4 — effects directly or indirectly increasing the negative influence of these components

Нами были выделены положительные и отрицательные факторы, которые могут влиять на семена при их прорастании в почвах и оценена возможность воздействия на них. Направление поисков при разработке препаратов для предпосевной обработки семян должно состоять в нахождении возможности обеспечения стимуляции положительных факторов и снижения действия отрицательных факторов, в чем и состоит его сложность, поскольку любые действия одновременно влияют на все факторы.

Трудно подобрать компоненты препарата-стимулятора, которые будут активизировать развитие эндифитов и микоризы, но не будут стимулировать фитопатогенные микроорганизмы. Также сложно подобрать фунгициды, которые будут оказывать стимулирующее влияние на прорастание семян, но не будут угнетать эндифиты, микоризу, замедлять биохимические реакции в семенах. Однако без использования фунгицидов аллелотоксины, выделяемые фитопатогенами, как было указано выше, не позволят контролировать ситуацию, поэтому, несмотря на замедление развития растений на начальном этапе при применении фунгицидов, их необходимо использовать.

Поскольку эффективность рекомендованных для растений фунгицидов основана на экспериментально проверенном преобладании их положительного влияния на эндифиты, микоризу

и биохимические процессы в семенах вследствие подавления воздействия фитопатогенов по сравнению с отрицательным воздействием фунгицидов, для конкретных культур следует использовать только рекомендуемые для них фунгициды, которые уже прошли экспериментальную проверку.

Таким образом, задача эффективного использования ССП состоит не только в стимуляции биохимических процессов в семенах, активизации развития эндифитов и микоризы, но и в снижении влияния ингибирующего воздействия на семена, эндифиты и микоризу, оказываемого аллелотоксинами почв, аллелотоксинами фитопатогенов и фунгицидами.

Следовательно, нами дана оценка эффективности действия препарата ССП-5 на яровую и озимую пшеницу, произрастающую на дерново-подзолистой почве с высоким агрофоном при его совместном применении с биологическим фунгицидом, рекомендуемым для этих видов пшеницы, — «Фитоспорином-М». Результаты экспериментов (см. табл. 1) свидетельствуют, о том, что даже рекомендованные для конкретных культур фунгициды могут оказывать стимулирующее (сорта Гранни и Немчиновская-17) или угнетающее (сорта Агата, Злата, Любава и Эстер) воздействия на разные сорта. Для сортов Любава, Злата, Агата применение ССП-5 лишь снижает угнетаю-

щее действие фунгицида (см. табл. 1), однако для сортов Лиза и Гранни ССП-5 стимулирует прорастание семян. Подобным образом ведут себя семена ярового ячменя и озимой ржи в вариантах опыта с обработкой семян фунгицидом «Ламадор» и препаратом ССП-5 с фунгицидом «Ламадор» (см. табл. 1). У всех сортов при использовании одного фунгицида «Ламадор» наблюдается угнетение развития семян, но при добавлении в раствор препарата ССП-5 угнетение резко снижается. По лабораторным данным, стимулирующее влияние обработки семян фунгицидом «Фитоспорин-М» с ССП-5 по сравнению с обработкой одним фунгицидом превысило 60 % (см. табл. 1).

Таким образом, лабораторные исследования показали, что использование препарата-стимулятора ССП-5 совместно с фунгицидами на всех изученных культурах ускоряет прорастание семян по сравнению с предпосевной обработкой семян только фунгицидами.

Выводы

1. Корректная оценка эффективности препаратов-стимуляторов для предпосевной обработки семян возможна только при их совместном использовании с протравителями, подавляющими развитие патогенных микроорганизмов.

2. Сорбционные препараты для предпосевной обработки семян зерновых культур способны смягчать ретардантный эффект протравителей.

3. Внесение избыточных доз минеральных удобрений ведет к снижению численности микелиальных актинобактерий и к увеличению доли токсинообразующих грибов в структуре микробиологического сообщества почв.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания МГУ № 121040800147-0.

Список литературы

- [1] Николаева М.Г., Разумова М.В., Гладкова В.Н. Справочник по проращиванию покоящихся семян. Л.: Наука, 1985. 506 с.
- [2] Сечняк Л.К., Киндрук Н.А., Слюсаренко О.К., Иващенко В.Г., Кузнецов Е.Д. Экология семян пшеницы. М.: Колос, 1983. 349 с.
- [3] Глинушкин А.П., Кудин С.М. Влияние протравителей на развитие болезней и формирование урожайности в агрофитоценозе яровой пшеницы // Нива Поволжья, 2010. № 2. С. 11–14.
- [4] Назарова А.А., Полищук С.Д. Особенности роста и развития кукурузы гибрида «Обский 140» при обработке семян препаратами на основе наночастиц железа, кобальта и их сочетания // Плодоводство и ягодоводство России, 2017. Т. 48. № 1. С. 174–177.
- [5] Сластя И.В. Использование соединений кремния для повышения продуктивности сортов ярового ячменя в условиях водного стресса // Сельскохозяйственная биология, 2013. № 2. С. 109–119.
- [6] Торопова Е.Ю., Стецов Г.Я. Предпосевное протравливание семян (методические аспекты) // Защита и карантин растений, 2018. № 2. С. 3–7.
- [7] Гродзинский А.М., Богдан Г.П., Головкин Э.А., Дзюбенко Н.Н., Мороз П.А., Прутенская Н.И. Аллелопатическое почвоутомление. Киев: Наукова думка, 1979. 248 с.
- [8] Коношина С.Н. Влияние различных способов использования почвы на ее аллелопатическую активность: дис. ... канд. с.-х. наук. Орел, Орловский государственный аграрный университет, 2000. 145 с.
- [9] Красильников Н.А. Микроорганизмы почвы и высшие растения. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 464 с.
- [10] Лобков В.Т. Использование почвенно-биологического фактора в земледелии: монография. Орел: Изд-во ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, 2017. 166 с.
- [11] Allelopathy. A Physiological Process with Ecological Implications / Reigosa M.J., Pedrol N., Gonzalez L., editors. Netherlands: Springer Publ., 2006. 637 p.
- [12] Cheng F., Cheng Z. Research Progress on the use of Plant Allelopathy in Agriculture and the Physiological and Ecological Mechanisms of Allelopathy // Frontiers in Plant Science, 2015, v. 6, article 1020.
- [13] Ghulam J., Shaikat M., Arshad N.C., Imran H., Muhammad A. Allelochemicals: sources, toxicity and microbial transformation in soil — a review // Annals of Microbiology, 2008, v. 58, no. 3, pp. 351–357.
- [14] McCalla T.M., Haskins F.A. Phytotoxic Substances from Soil Microorganisms and Crop Residues // Bacteriological Reviews, 1964, v. 28, no. 2, pp. 181–207.
- [15] Rice E.L. Allelopathy. New York: Academic Press, 1984, 422 p.
- [16] Благовещенская Е.Ю. Эндифитные грибы злаков: автореф. дис. ... канд. биол. наук. М.: МГУ, 2006. 26 с.
- [17] Ryan R.P., Germaine K., Franks A., Ryan D.J., Dowling D.N. Bacterial endophytes: recent developments and applications // FEMS Microbiol Lett., 2008, v. 278, pp. 1–9.
- [18] Gollner M.J., Wagentristl H., Liebhard P., Friedel J.K. Yield and arbuscular mycorrhiza of winter rye in a 40-year fertilisation trial // Agronomy for sustainable development, 2011, v. 31, no. 2, pp. 373–378.
- [19] Berruti A., Bianciotto V., Lumini E. Seasonal variation in winter wheat field soil arbuscular mycorrhizal fungus communities after non-mycorrhizal crop cultivation // Mycorrhiza, 2018, v. 28, no. 5, pp. 535–548.
- [20] Kaidzu T., Suzuki K., Sugiyama H., Onur Akca M., Ergül A., Can Turgay O., Nonaka M., Harada N. The composition characteristics of arbuscular mycorrhizal fungal communities associated with barley in saline-alkaline soils in Central Anatolia // Soil Science and Plant Nutrition, 2020, v. 66, no. 2, pp. 268–274.
- [21] Соколова Т.А. Низкомолекулярные органические кислоты в почвах: источники, состав, содержание, функции в почвах (обзор) // Почвоведение, 2020. № 5. С. 559–575.
- [22] Chen J., Ullah C., Reichelt M. et al. The phytopathogenic fungus *Sclerotinia sclerotiorum* detoxifies plant glucosinolate hydrolysis products via an isothiocyanate hydrolase // Nature communication, 2020, v. 11, no. 1, pp. 1–12.

- [23] Meena M., Samal S. *Alternaria* host-specific (HSTs) toxins: An overview of chemical characterization, target sites, regulation and their toxic effects // *Toxicology reports*, 2019, v. 6, pp. 745–758.
- [24] Proctor R. H., McCormick S. P., Kim H. S. et al. Evolution of structural diversity of trichothecenes, a family of toxins produced by plant pathogenic and entomopathogenic fungi // *PLoS pathogens*, 2018, v. 14, no. 4, p. e1006946.
- [25] Inderjit. Plant phenolics in allelopathy // *The Botanical Review*, 1996, v. 62, pp. 186–202.
- [26] Kong C.H., Xuan T.D., Khanh T.D., Tran H.D., Trung N.T. Allelochemicals and signaling chemicals in plants // *Molecules*, 2019, v. 24, no. 15, p. 2737.
- [27] Weir T.L., Park S., Vivanco. J.M. Biochemical and physiological mechanisms mediated by allelochemicals // *Curr. Opin. Plant Biol.*, 2004, v. 7, no. 4, pp. 472–479.
- [28] Федотов Г.Н., Шоба С.А., Горепекин И.В. Аллелотоксичность почв и способы уменьшения ее негативного влияния на начальную стадию развития растений // *Почвоведение*, 2020. № 8. С. 1007–1015.
- [29] Горепекин И.В., Федотов Г.Н., Потапов Д.И., Батырев Ю.П., Шалаев В.С. Снижение аллелотоксичности почв и почвенных субстратов // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2022. Т. 26. № 4. С. 46–52. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-4-46-52
- [30] Шоба С.А., Горепекин И.В., Федотов Г.Н., Грачева Т.А., Салигареева О.А. Природа повышения эффективности применения сорбционно-стимулирующих препаратов для предпосевной обработки семян при введении в их состав неионогенных ПАВ // *Доклады Российской академии наук. Науки о жизни*, 2020. № 494(1). С. 513–516.
- [31] Мирчинк Т.Г. *Почвенная микология: Учебник*. М.: Изд-во МГУ, 1988. 220 с.
- [32] Fomsgaard I.S., Mortensen A.G., Carlsen S.C.K. Microbial transformation products of benzoxazolinone and benzoxazinone allelochemicals—a review // *Chemosphere*, 2004, v. 54, no. 8, pp. 1025–1038.
- [33] Einhellig F.A. Interactions involving allelopathy in cropping systems // *Agronomy J.*, 1996, v. 88, no. 6, pp. 886–893.
- [34] Latif S., Chiapusio G., Weston L.A. Allelopathy and the role of allelochemicals in plant defence // *Advances in botanical research*. Academic Press, 2017, v. 82, pp. 19–54.
- [35] Tharayil N., Bhowmik P.C., Xing B. Bioavailability of allelochemicals as affected by companion compounds in soil matrices // *J. Agricultural Food Chem.*, 2008, v. 56, no. 10, pp. 3706–3713.
- [36] Weston L.A., Mathesius U. Flavonoids: their structure, biosynthesis and role in the rhizosphere, including allelopathy // *J. Chem. Ecology*, 2013, v. 39, no. 2, pp. 283–297.
- [37] Федотов Г.Н., Шоба С.А., Федотова М.Ф., Горепекин И.В. Влияние аллелотоксичности почв на прорастание семян зерновых культур // *Почвоведение*, 2019. № 4. С. 489–496.
- [38] *Методы почвенной микробиологии и биохимии* / под ред. Д.Г. Звягинцева. М.: Изд-во МГУ, 1991. 304 с.
- [39] Лысак Л.В., Добровольская Т.Г., Скворцова И.Н. *Методы оценки бактериального разнообразия почв и идентификации почвенных бактерий*. М.: МАКС Пресс, 2003. 120 с.
- [40] Зинченко М.К., Селицкая О.В. Биологическая токсичность серой лесной почвы в зависимости от систем удобрений // *Агрехимический вестник*, 2011. № 5. С. 38–40.
- [41] Kjoller R., Rosendahl S. Effects of fungicides on arbuscular mycorrhizal fungi: differential responses in alkaline phosphatase activity of external and internal hyphae // *Biology and Fertility of Soils*, 2000, v. 31, no. 5, pp. 361–365.
- [42] Nettles R., Watkins J., Ricks K., Boyer M., Licht M., Atwood L.W., Peoples M., Smith R.G., Mortensen D.A., Koide R.T. Influence of pesticide seed treatments on rhizosphere fungal and bacterial communities and leaf fungal endophyte communities in maize and soybean // *Applied Soil Ecology*, 2016, v. 102, pp. 61–69.
- [43] Prior R., Mittelbach M., Begerow D. Impact of three different fungicides on fungal epi- and endophytic communities of common bean (*Phaseolus vulgaris*) and broad bean (*Vicia faba*) // *J. of Environmental Science and Health, Part B*, 2017, v. 52, no. 6, pp. 376–386.

Сведения об авторах

Федотов Геннадий Николаевич✉ — д-р биол. наук, вед. науч. сотр. факультета почвоведения, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», gennadiy.fedotov@gmail.com

Грачева Татьяна Александровна — канд. биол. наук, ст. преподаватель факультета почвоведения, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», fedotov@gmail.com

Горепекин Иван Владимирович — науч. сотр., ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»; Евразийский центр по продовольственной безопасности (Аграрный центр МГУ), decembrist96@yandex.ru

Батырев Юрий Павлович — канд. техн. наук, доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), batyrev@bmstu.ru

Поступила в редакцию 20.03.2024.

Одобрено после рецензирования 29.11.2024.

Принята к публикации 04.02.2025.

EFFECT OF PHYTOPATHOGEN CONTROL ON EFFICIENCY OF SORBENT-STIMULATING PREPARATIONS ON GRAIN CROPS

G.N. Fedotov¹✉, T.A. Gracheva¹, I.V. Gorepekin^{1,2}, Yu.P. Batyrev³

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

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

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

gennadiy.fedotov@gmail.com

Pre-sowing seed treatment is one of the most developed practices in agriculture. Despite this, reproducible positive effects have not yet been obtained with the use of stimulating preparations. One explanation may be that the consideration of seed stimulation was carried out in isolation from the soils and the microorganisms in them. To take into account these factors, the study of the efficiency for one of the stimulant classes — sorption-stimulating preparations (SSP), and also the development of approaches to the creation of effective stimulant preparations was carried out. The objects of the study were seeds of cultivars of spring and winter wheat, spring barley and winter rye. The tests were performed on sod-podzolic soil, changing its allelotoxicity due to sample preparation. The fixed indicator in assessing allelotoxicity, as well as the efficiency of SSP, was the total length of seed seedlings. Determination of the microbiological composition of soils was carried out using direct luminescent microscopy and seeding on nutrient media. During the experiments, it was found that an increase in the allelotoxicity of soil samples led to a noticeable decrease in the effects of SSP stimulation for spring wheat seeds. With the addition to the composition of the preparation of sucrose, which promotes the development of microorganisms, and an increase in the dose of the composition by 1.5 times, the effects of stimulation continued to decrease, reaching inhibition values for some varieties. On spring barley, an increase in the dose of the preparation, on the contrary, led to an increase in the efficiency of the SSP use. However, an increase in the values of the nutrients provision to an excessive level at which phytopathogenic fungi develop, showed that SSP with sucrose no longer stimulates, but inhibits the germination of seeds and the development of barley seedlings. Based on the data obtained, it is concluded that allelotoxins can enter seeds and developing plants not only from soils, but also from phytopathogens, therefore, the use of stimulants without limiting the development of phytopathogens does not solve the problem of protecting seeds from allelotoxins. To do this, it is proposed to use SSP together with fungicides. Laboratory experiments have confirmed the correctness of this approach — the use of SSP in conjunction with fungicides in all cases has a stimulating effect on the varieties and crops of cereals studied by us.

Keywords soil allelotoxicity, seed stimulation, pre-sowing seed treatment, fungicides, the retardant effect of fungicides

Suggested citation: Fedotov G.N., Gracheva T.A., Gorepekin I.V., Batyrev Yu.P. *Vliyaniye bor'by s fitopatogenami na effektivnost' ispol'zovaniya sorbtionno-stimuliruyushchikh preparatov na zernovykh kul'turakh* [Effect of phytopathogen control on efficiency of sorbent-stimulating preparations on grain crops]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 2, pp. 70–81. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-2-70-81

References

- [1] Nikolaeva M.G., Razumova M.V., Gladkova V.N. *Spravochnik po prorashchivaniyu pokoyashchikhsya semyan* [Handbook of germination of dormant seeds]. Leningrad: Nauka, 1985, 506 p.
- [2] Sechnyak L.K., Kindruk N.A., Slyusarenko O.K., Ivashchenko V.G., Kuznetsov E.D. *Ekologiya semyan pshenitsy* [Ecology of wheat seeds]. Moscow: Kolos, 1983, 349 p.
- [3] Glinushkin A.P., Kudin S.M. *Vliyaniye protraviteley na razvitie bolezney i formirovaniye urozhaynosti v agrofytotsenoze yarovoy pshenitsy* [The effect of mordants on the development of diseases and the formation of yields in the agrophytocenosis of spring wheat]. *Niva Povolzh'ya*, 2010, no. 2, pp. 11–14.
- [4] Nazarova A.A., Polishchuk S.D. *Osobennosti rosta i razvitiya kukuruzy gibrida «Obskiy 140» pri obrabotke semyan preparatami na osnove nanochastits zheleza, kobal'ta i ikh sochetaniya* [Features of the growth and development of corn hybrid «Ob 140» in the treatment of seeds with preparations based on iron, cobalt nanoparticles and their combination]. *Plodovodstvo i yagodovodstvo Rossii* [Fruit growing and berry growing of Russia], 2017, v. 48, no. 1, pp. 174–177.
- [5] Slastyia I.V. *Ispol'zovaniye soedineniy kremniya dlya povysheniya produktivnosti sortov yarovogo yachmenya v usloviyakh vodnogo stressa* [The use of silicon compounds to increase the productivity of spring barley varieties under conditions of water stress]. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya*, 2013, no. 2, pp. 109–119.
- [6] Toropova E.Yu., Stetsov G.Ya. *Predposevnoye protravlivaniye semyan (metodicheskie aspekty)* [Pre-sowing seed treatment (methodological aspects)]. *Zashchita i karantin rasteniy* [Plant protection and quarantine], 2018, no. 2, pp. 3–7.
- [7] Grodzinskiy A.M., Bogdan G.P., Golovko E.A., Dzyubenko N.N., Moroz P.A., Prutenskaya N.I. *Allelopatischeskoe pochvoutomlenie* [Allelopathic soil fatigue]. Kiev: Naukova dumka, 1979, 248 p.

- [8] Konoshina S.N. *Vliyaniye razlichnykh sposobov ispol'zovaniya pochvyna ee allelopaticheskuyu aktivnost'* [The influence of different ways of using soil on its allelopathic activity]. Dis. Cand. Sci. (Agric.). Orel, Orel State Agricultural University, 2000, 145 p.
- [9] Krasil'nikov N.A. *Mikroorganizmy pochvy i vysshie rasteniya* [Soil microorganisms and higher plants]. Moscow: USSR Academy of Science Publ., 1958, 464 p.
- [10] Lobkov V.T. *Ispol'zovanie pochvenno-biologicheskogo faktora v zemledelii* [The use of the soil-biological factor in agriculture]. Orel: Orlovskiy GAU Publ., 2017, 166 p.
- [11] Allelopathy. A Physiological Process with Ecological Implications / Reigosa M.J., Pedrol N., Gonzalez L, editors. Netherlands: Springer Publ., 2006, 637 p.
- [12] Cheng F., Cheng Z. Research Progress on the use of Plant Allelopathy in Agriculture and the Physiological and Ecological Mechanisms of Allelopathy. *Frontiers in Plant Science*, 2015, v. 6, article 1020.
- [13] Ghulam J., Shaukat M., Arshad N.C., Imran H., Muhammad A. Allelochemicals: sources, toxicity and microbial transformation in soil — a review. *Annals of Microbiology*, 2008, v. 58, no. 3, pp. 351–357.
- [14] McCalla T.M., Haskins F.A. Phytotoxic Substances from Soil Microorganisms and Crop Residues // *Bacteriological Reviews*, 1964, v. 28, no. 2, pp. 181–207.
- [15] Rice E.L. *Allelopathy*. New York: Academic Press, 1984, 422 p.
- [16] Blagoveshchenskaya E.Yu. *Endofitnye griby zlakov* [Endophytic fungi of cereals]. Dis. Cand. Sci. (Biology). Moscow, Moscow State University, 2006, 26 p.
- [17] Ryan R.P., Germaine K., Franks A., Ryan D.J., Dowling D.N. Bacterial endophytes: recent developments and applications. *FEMS Microbiol Lett.*, 2008, v. 278, pp. 1–9.
- [18] Gollner M.J., Wagentristsl H., Liebhard P., Friedel J.K. Yield and arbuscular mycorrhiza of winter rye in a 40-year fertilisation trial. *Agronomy for sustainable development*, 2011, v. 31, no. 2, pp. 373–378.
- [19] Berruti A., Bianciotto V., Lumini E. Seasonal variation in winter wheat field soil arbuscular mycorrhizal fungus communities after non-mycorrhizal crop cultivation. *Mycorrhiza*, 2018, v. 28, no. 5, pp. 535–548.
- [20] Kaidzu T., Suzuki K., Sugiyama H., Onur Akca M., Ergül A., Can Turgay O., Nonaka M., Harada N. The composition characteristics of arbuscular mycorrhizal fungal communities associated with barley in saline-alkaline soils in Central Anatolia. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2020, v. 66, no. 2, pp. 268–274.
- [21] Sokolova T.A. *Nizkomolekulyarnye organicheskie kisloty v pochvakh: istochniki, sostav, sodержanie, funktsii v pochvakh (obzor)* [Low-molecular-weight organic acids in soils: sources, composition, concentrations, and functions: a review]. *Pochvovedenie [Eurasian Soil Science]*, 2020, v. 53, pp. 580–594.
- [22] Chen J., Ullah C., Reichelt M. et al. The phytopathogenic fungus *Sclerotinia sclerotiorum* detoxifies plant glucosinolate hydrolysis products via an isothiocyanate hydrolase. *Nature communication*, 2020, v. 11, no. 1, pp. 1–12.
- [23] Meena M., Samal S. Alternaria host-specific (HSTs) toxins: An overview of chemical characterization, target sites, regulation and their toxic effects. *Toxicology reports*, 2019, v. 6, pp. 745–758.
- [24] Proctor R. H., McCormick S. P., Kim H. S. et al. Evolution of structural diversity of trichothecenes, a family of toxins produced by plant pathogenic and entomopathogenic fungi. *PLoS pathogens*, 2018, v. 14, no. 4, p. e1006946.
- [25] Inderjit. Plant phenolics in allelopathy. *The Botanical Review*, 1996, v. 62, pp. 186–202.
- [26] Kong C.H., Xuan T.D., Khanh T.D., Tran H.D., Trung N.T. Allelochemicals and signaling chemicals in plants. *Molecules*, 2019, v. 24, no. 15, p. 2737.
- [27] Weir T.L., Park S., Vivanco. J.M. Biochemical and physiological mechanisms mediated by allelochemicals. *Curr. Opin. Plant Biol.*, 2004, v. 7, no. 4, pp. 472–479.
- [28] Fedotov G.N., Shoba S.A., Gorepekin I.V. *Allelotoksichnost' pochv i sposoby umen'sheniya ee negativnogo vliyaniya na nachal'nyuyu stadiyu razvitiya rasteniy* [Soil Allelotoxicity and Methods to Reduce Its Adverse Influence at the Initial Stage of Plant Development]. *Pochvovedenie [Eurasian Soil Science]*, 2020, v. 53, no. 8, pp. 1165–1172.
- [29] Gorepekin I.V., Fedotov G.N., Potapov D.I., Batyrev Yu.P., Shalaev V.S. *Snizhenie allelotoksichnosti pochv i pochvennykh substratov* [Allelotoxicity of soils and soil substrates reduction] // *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 4, pp. 46–52. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-4-46-52
- [30] Shoba S.A., Gorepekin I.V., Fedotov G.N., Gracheva T.A., Saligareeva O.A. *Priroda povysheniya effektivnosti primeneniya sorbtsionno-stimuliruyushchikh preparatov dlya predposevnoy obrabotki semyan pri vvedenii v ikh sostav neionogennykh PAV* [The Nature of the Increased Efficiency of Sorption-Stimulating Preparations Containing Non-Ionic Surfactants for Pre-Sowing Seed Treatment]. *Doklady Rossiyskoy akademii nauk. Nauki o zhizni [Doklady Biological Sciences]*, 2020, v. 494, no. 1, pp. 248–250.
- [31] Mirchink T.G. *Pochvennaya mikologiya* [Soil mycology]. Moscow: Moscow State University Publ., 1988, 220 p.
- [32] Fomsgaard I.S., Mortensen A.G., Carlsen S.C.K. Microbial transformation products of benzoxazolinone and benzoxazinone allelochemicals—a review // *Chemosphere*, 2004, v. 54, no. 8, pp. 1025–1038.
- [33] Einhellig F.A. Interactions involving allelopathy in cropping systems // *Agronomy J.*, 1996, v. 88, no. 6, pp. 886–893.
- [34] Latif S., Chiapusio G., Weston L.A. Allelopathy and the role of allelochemicals in plant defence // *Advances in botanical research*. Academic Press, 2017, v. 82, pp. 19–54.
- [35] Tharayil N., Bhowmik P.C., Xing B. Bioavailability of allelochemicals as affected by companion compounds in soil matrices // *J. Agricultural Food Chem.*, 2008, v. 56, no. 10, pp. 3706–3713.
- [36] Weston L.A., Mathesius U. Flavonoids: their structure, biosynthesis and role in the rhizosphere, including allelopathy // *J. Chem. Ecology*, 2013, v. 39, no. 2, pp. 283–297.
- [37] Fedotov G.N., Shoba S.A., Fedotova M.F., Gorepekin I.V. *Vliyaniye allelotoksichnosti pochv na prorastanie semyan zernovykh kul'tur* [The influence of soil allelotoxicity on the germination of grain crop seeds]. *Pochvovedenie [Soil Science]*, 2019, no. 4, pp. 489–496.

- [38] *Metody pochvennoy mikrobiologii i biokhimii* [Methods of soil microbiology and biochemistry]. Ed. D.G. Zvyagintsev. Moscow: Moscow State University Publ., 1991, 304 p.
- [39] Lysak L.V., Dobrovolskaya T.G., Skvortsova I.N. *Metody otsenki bakterial'nogo raznoobraziya pochv i identifikatsii pochvennykh bakteriy* [Methods for assessing bacterial diversity of soils and identification of soil bacteria]. Moscow: MAKS Press Publ., 2003, 120 p.
- [40] Zinchenko M.K., Selitskaya O.V. *Biologicheskaya toksichnost' seroy lesnoy pochvy v zavisimosti ot sistem udobreniy* [Biological toxicity of grey forest soil depending on fertilizer systems]. *Agrokhimicheskiy vestnik* [Agrochemical Bulletin], 2011, v. 5, pp. 38–40.
- [41] Kjoller R., Rosendahl S. Effects of fungicides on arbuscular mycorrhizal fungi: differential responses in alkaline phosphatase activity of external and internal hyphae. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, v. 31, no. 5, pp. 361–365.
- [42] Nettles R., Watkins J., Ricks K., Boyer M., Licht M., Atwood L.W., Peoples M., Smith R.G., Mortensen D.A., Koide R.T. Influence of pesticide seed treatments on rhizosphere fungal and bacterial communities and leaf fungal endophyte communities in maize and soybean. *Applied Soil Ecology*, 2016, v. 102, pp. 61–69.
- [43] Prior R., Mittelbach M., Begerow D. Impact of three different fungicides on fungal epi- and endophytic communities of common bean (*Phaseolus vulgaris*) and broad bean (*Vicia faba*). *J. of Environmental Science and Health, Part B*, 2017, v. 52, no. 6, pp. 376–386.

The work was carried out within the framework of the MSU state assignment theme № 121040800147-0.

Authors' information

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

Gracheva Tat'yana Aleksandrovna — Cand. Sci. (Biology), Senior Lecturer of the Faculty of Soil Science of the Lomonosov Moscow State University, gennadiy.fedotov@gmail.com

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

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

Received 20.03.2024.

Approved after review 29.11.2024.

Accepted for publication 04.02.2025.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

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

The authors declare that there is no conflict of interest

ПРОЦЕДУРА ОСВЕТЛЕНИЯ БУКОВОГО, ДУБОВОГО, КЛЕНОВОГО И ЯСЕНЕВОГО ШПОНОВ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ИК-СПЕКТРЫ

С.А. Баскаков¹✉, Ю.В. Баскакова¹, А.В. Жарковская¹,
С.С. Красникова¹, Е.Н. Кабачков^{1,2}, Ю.М. Шульга¹

¹ФГБУН «Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук», Россия, 142432, Московская обл., г. Черноголовка, пр. Академика Семенова, д. 1
²Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук (ИФТТ РАН), Россия, 142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 2

sabaskakov@gmail.com

Описана в простейшем варианте известная концепция прозрачной древесины и указаны публикации, посвященные этому вопросу. Проведена процедура осветления для шпона бука, дуба, клена и ясеня с использованием только пероксида водорода вместо традиционных химических реактивов, содержащих хлориты или сульфиты. Для всех исследованных образцов было установлено, что после осветления и сушки происходит уменьшение размера (усадка) в направлении, перпендикулярном направлению роста. Впервые с использованием ИК-спектроскопии обнаружено, что при таком осветлении из шпона удаляются компоненты со слабыми водородными связями. Используя декомпозицию фрагмента ИК-спектра в области 1800...1500 см⁻¹, были выделены полосы поглощения валентных колебаний связей С=О и подтвержден эффект уменьшения в осветленной древесине концентрации компонентов, имеющих в своем составе карбонильные группы. Описаны также процедуры пропитки осветленного шпона эпоксидной смолой и определения лигнина Класона. Показано, что эффективность удаления лигнина существенным образом зависит от сорта древесины.

Ключевые слова: прозрачная древесина, ИК-спектры, бук, дуб, клен, ясень

Ссылка для цитирования: Баскаков С.А., Баскакова Ю.В., Жарковская А.В., Красникова С.С., Кабачков Е.Н., Шульга Ю.М. Процедура осветления букового, дубового, кленового и ясеневых шпонов и ее влияние на ИК-спектры // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 2. С. 82–93.
DOI: 10.18698/2542-1468-2025-2-82-93

Прозрачная древесина — это материал, который начинает приобретать популярность [1–10]. Предполагается, что такую древесину можно использовать в качестве нового функционального сырья для замены других светопроводящих веществ, в частности стекла. Очевидным преимуществом прозрачной древесины по сравнению со стеклом является меньший удельный вес. С ее помощью можно обеспечить также безопасность использования продукции в связи с отсутствием хрупкости, имеющейся у стекла. Прозрачная древесина отличается от стекла большими гибкостью и устойчивостью к механическим повреждениям. Стекло легко трескается и разбивается, а прозрачная древесина способна выдерживать значительные нагрузки и удары, что существенно повышает уровень безопасности при использовании этого материала в различных конструкциях [5, 6]. Например, окна из прозрачной древесины могут заменять остекление в зданиях, расположенных в зонах

повышенной сейсмической активности или подверженных сильным ветровым нагрузкам.

Отметим экологичность прозрачной древесины. Она производится из возобновляемого сырья, что способствует снижению углеродного следа и уменьшению зависимости от ископаемых ресурсов [7]. Кроме того, на производство прозрачной древесины затрачивается меньше энергии по сравнению с производством стекла, что также положительно сказывается на окружающей среде.

Таким образом, прозрачная древесина имеет большой потенциал для применения в разнообразных областях экономики, начиная от строительства и заканчивая созданием новых типов электронных дисплеев и солнечных батарей [9, 10]. Продолжающиеся исследования и разработки в этой области открывают новые возможности для ее использования в будущем.

Концепция прозрачной древесины была предложена в 1992 г. [11]. В простейшем представлении метод ее изготовления заключается в том, чтобы сначала использовать раствор для

химического удаления лигнина из древесины, а затем полученный пористый материал наполнить связующим, например, смолой, олигомером или полимером с показателем преломления, близким к показателю преломления целлюлозы (для устранения светорассеяния на границе между клетками древесины). Почему нужно удалять лигнин? Потому что именно лигнин определяет оптические свойства и естественный цвет древесины. Отметим, что связующее, которое вводят в поры, ранее заполненные лигнином, может сообщать прозрачному дереву новые потребительские свойства. В частности, материалы с большой скрытой теплотой плавления в температурном интервале 30...50 °С, будучи помещенными в поры прозрачной древесины, могут препятствовать нагреву помещения днем и остыванию (охлаждению) ночью, если из модифицированной таким образом прозрачной древесины изготавливать внешние стены помещения.

Основными химическими веществами, используемыми для удаления лигнина, служат соединения натрия — гипохлорит, хлорит и сульфит [11–17]. Эти вещества позволяют эффективно удалить лигнин для достижения эффекта обесцвечивания древесины, однако это сопровождается загрязнением окружающей среды. В частности, гипохлориты и хлориды, образующиеся в процессе обработки, способны вызывать коррозию металлического оборудования и загрязнять сточные воды.

К другим более экологичным, но менее распространенным методам удаления лигнина относятся методы, основанные на использовании пероксида водорода [18–21]. При этом каждая модификация метода обесцвечивания характеризуется своими особенностями, которые следует изучать и оптимизировать для решения конкретных задач. Очевидно также, что в рамках одного метода осветления можно получить разные результаты, если им пользоваться для осветления древесины разных сортов, так как они обладают различными свойствами, такими как содержание лигнина, твердость, структура и плотность волокон, что влияет на эффективность выбранного метода обесцвечивания [16, 19]. Например, некоторые виды древесины могут требовать более длительного времени воздействия химических веществ или более высоких концентраций реагентов для достижения желаемого результата. Мягкие породы дерева — сосна или береза легче поддаются обработке и требуют меньше времени и концентрации обесцвечивающего реагента. Такие твердые породы, как дуб или бук, напротив, могут потребовать более агрессивных методов

и длительных процедур для достижения необходимого уровня обесцвечивания.

Судя по литературным данным, наибольший успех в осветлении был достигнут при использовании шпона из бальсы (или бальзы — *Ochroma pyramidale*). На белом шпоне бальсы практически не видны годовые кольца. Древесина бальсы легкая, поры, в которых находится лигнин, — большие. Процесс выделения лигнина проходит легче и за более короткое время. Единственным недостатком у этого материала в России является его высокая цена, поскольку дерево бальсы произрастает в экваториальной части Южной Америки.

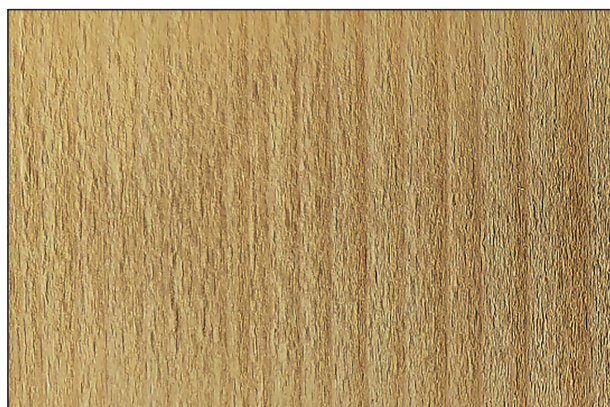
Цель работы

Цель работы — получение образцов прозрачного шпона бука (*Fagus sylvatica*), дуба (*Quercus robur*), клена (*Acer pseudoplatanus*) и ясеня (*Fraxinus excelsior*) с использованием экологически более приемлемого реактива — пероксида водорода вместо традиционных химических реактивов, которые содержат хлориты или сульфиты, а также изучение с помощью ИК-спектроскопии особенностей изменения состава каждого типа древесины после процедуры осветления.

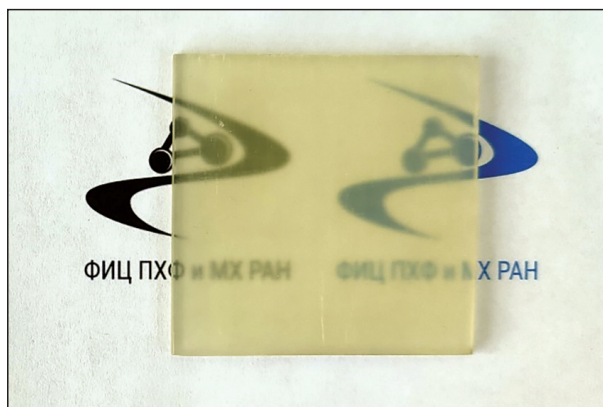
Материалы и методы

Материалы. Образцы шпона дуба, ясеня, клена и бука толщиной 0,6 мм, сорт А, гидроксид натрия марки «х. ч.» (ГОСТ Р 55064–201), пероксид водорода в концентрации 37 % (ГОСТ 177–88), эпоксидная смола и отвердитель Artline Honey (для ювелирных работ).

Процедура обесцвечивания (выделение лигнина). Обесцвечивание шпонов проводили по следующей методике. Шпоны нарезали квадратами со стороной 50 ± 5 мм, помещали их в химический стакан, заливали 600 мл 5%-го раствора NaOH и нагревали до кипения. Варку проводили в течение 1 ч для удаления щелочного лигнина. Затем щелок коричнево-красного цвета сливали и добавляли еще 600 мл белого 5%-го щелока и после закипания раствора порциями вводили 200 мл 37%-го пероксида водорода. Введение H_2O_2 выполняли порциями по 20...30 мл по мере прекращения выделения газообразного кислорода. Отбеленные образцы шпона промывали в дистиллированной воде до нейтральной реакции и сушили при комнатной температуре в течение 24 ч. Процедура отбеливания была идентичной для всех четырех видов древесины (клена, дуба, ясеня и бука).



а



б

Рис. 1. Шпон бука (а) и прозрачный композит, состоящий из четырех слоев осветленного шпона бука, пропитанного эпоксидной смолой (б)

Fig. 1. Photographs of beech veneer (а) and a transparent composite consisting of 4 layers of bleached beech veneer impregnated with epoxy resin (б)

Процедура пропитки шпона эпоксидной смолой. Перед пропиткой смолой образцы беленого шпона не высушивали от воды, а сменяли растворитель. Воду в образцах замещали ацетоном. Далее, не допуская высыхания ацетона, образцы переносили в герметичную емкость, в которую предварительно помещали смесь эпоксидной смолы и отвердителя в пропорции 2:1. Количество смолы было таким, чтобы образцы шпона полностью были ею покрыты. Емкость вакуумировали с помощью форвакуумного насоса для удаления ацетона из древесины и замены на смолу. Пропитанные смолой образцы шпона извлекали из формы и укладывали в четыре слоя таким образом, чтобы направление целлюлозных волокон каждого последующего слоя изменялось на 90° (в виде перевязки). Масса шпона после этого увеличивалась приблизительно на 10 % по сравнению с первоначальными образцами.

Определение лигнина Класона. Из абсолютно сухого образца беленого шпона брали навеску около 1 г, взвешенную с погрешностью не более 0,2 мг, помещали в химический стакан и смачивали 15 см кислотной смесью (шесть частей 75%-й серной кислоты и одна часть 85%-й ортофосфорной кислоты). Стакан с пробой помещали в термостат при температуре $35,0 \pm 0,5^\circ\text{C}$ и выдерживали 45 мин, периодически перемешивая содержимое стакана. По истечении указанного времени в стакан добавляли 400 мл дистиллированной воды, содержимое стакана нагревали до кипения и кипятили 15 мин. Стакан с пробой оставляли на 10 мин для охлаждения и отстаивания выделившегося осадка — лигнина. Раствор с осадком лигнина

фильтровали через бумажный фильтр, лигнин промывали раствором хлорида натрия до полного удаления следов кислоты. Фильтр с осадком лигнина высушивали в сушильном шкафу при температуре $103 \pm 2^\circ\text{C}$ и взвешивали. По разнице массы чистого фильтра и фильтра с лигнином определяли массу последнего.

ИК-спектроскопия. ИК-спектры (разрешение 4 см^{-1} , число сканирований 32) записывали при комнатной температуре в диапазоне частот $450 \dots 4000\text{ см}^{-1}$ на ИК-Фурье-спектрометре Perkin-Elmer Spectrum Two (Waltham, MA, США) с приставкой ATR.

Результаты и обсуждение

Оптические фотографии шпона. На рис. 1 представлен шпон бука толщиной 0,6 мм и композит из четырех осветленных и пропитанных эпоксидной смолой шпонов, сложенных стопкой так, чтобы придать композиту максимальную жесткость. Здесь композит достаточно прозрачный — можно прочесть текст на бумаге под композитом. Два внутренних листа шпона можно пропитывать стеарином или воском, для которых характерен переход из твердого в жидкое состояние с большой скрытой теплотой. Такая конструкция будет надежной гарантией от вытекания материала с фазовым переходом при переходе его в жидкое состояние.

Опишем результаты исследования превращений, которые происходят со шпоном на этапе осветления.

На рис. 2 представлены образцы шпонов бука, дуба, клена и ясеня до и после осветления.

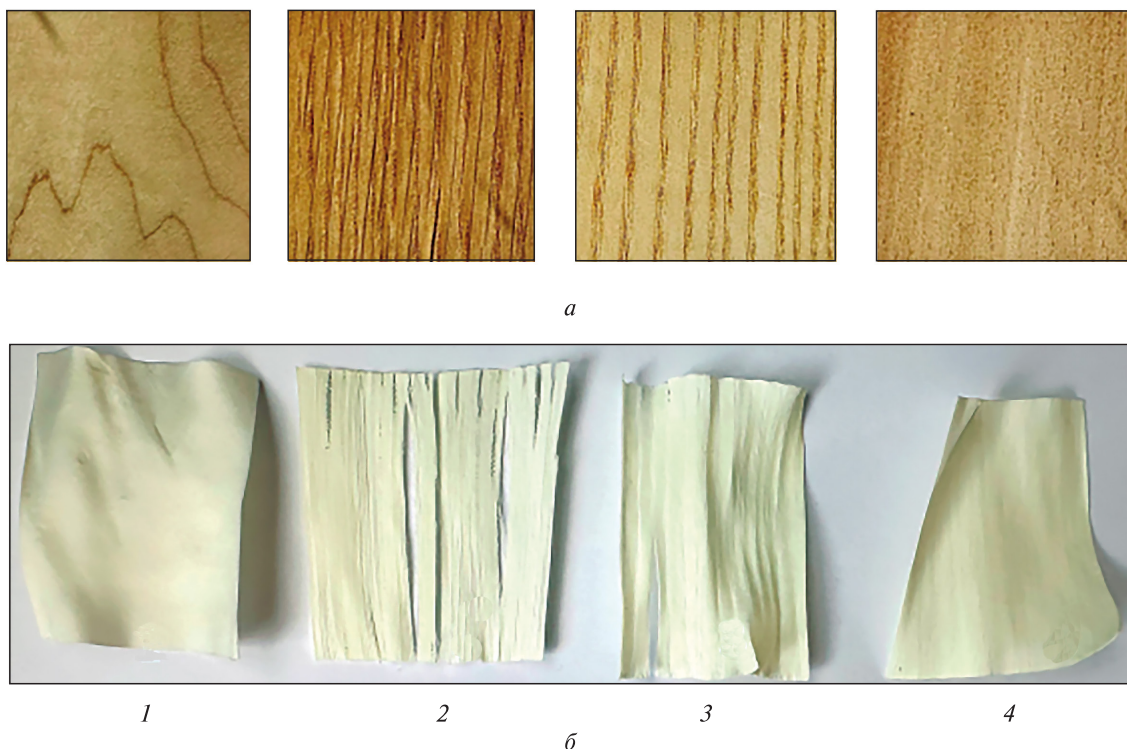


Рис. 2. Шпоны клена (1), дуба (2), ясеня (3) и бука (4) до (а) и после процедуры осветления промывки водой и сушки на расположенной горизонтально стеклянной подложке при температуре 50 °С (б)
Fig. 2. Photographs of maple (1), oak (2), ash (3) and beech (4) veneers before (a) and after the bleaching procedure, water washing and drying on a horizontal glass substrate at 50°C (б)

Видно, что после осветления высушенные образцы шпонов действительно стали более светлыми. Образцы шпона дуба и клена после осветления расслаиваются вдоль направления роста, причем в случае дуба это расслоение выражено наиболее ярко. Для всех образцов после осветления и сушки происходит уменьшение размера (усадка) в направлении, перпендикулярном направлению роста. В процессе сушки все образцы также изгибаются, что создает дополнительные трудности для их дальнейшей переработки.

ИК-спектры. ИК-спектры исследуемых образцов до и после осветления представлены на рис. 3–6. Поскольку ИК-спектры древесины описаны во многих публикациях [22–24], отнесение некоторых полос поглощения не вызывает никаких сомнений.

Например, широкая полоса поглощения в диапазоне 3700...2960 см⁻¹ обусловлена в основном валентными колебаниями связей О-Н. Обычно форму этой полосы поглощения в публикациях, посвященных технологическим процессам, не анализируют. Однако из сравнения формы этой полосы поглощения до и после обработки однозначно следует вывод, о том, что в процессе осветления из шпонов удаляются компоненты со слабыми водородными связями.

Это следует из данных, представленных на рис. 7, где видно, что в результате осветления центр тяжести полосы поглощения смещается в сторону более низких волновых чисел.

Другой очевидный эффект осветления — это уменьшение в шпоне концентрации древесных компонент, имеющих в составе карбонильные группы, которые проявляются в ИК-спектре в виде полос поглощения с максимумом в диапазоне 1743...1733 см⁻¹. Проявление этого эффекта представлено на врезках (см. рис. 3 и 5). Из литературы [25–35] известно, что вклад в интенсивность этой полосы поглощения могут давать такие компоненты древесины, как алкиловые эфиры (1750...1758 см⁻¹), ароматические эфиры (1722...1742 см⁻¹), полилактонная кислота (1706...1714 см⁻¹), сопряженные кетоны (1680...1683 см⁻¹) и *p*-замещенные α -ароматические кетоны (1661...1670 см⁻¹). Декомпозиция фрагмента спектра в обсуждаемом диапазоне волновых чисел по алгоритму, предложенному в работе [25], показала, что все указанные фрагменты имеются в необработанных образцах древесины. Декомпозиции спектров изображены на рис. 8, 9. В табл. 1 приведены результаты декомпозиции обозначенного участка для спектров шпонов четырех типов древесины, откуда видно, что максималь-

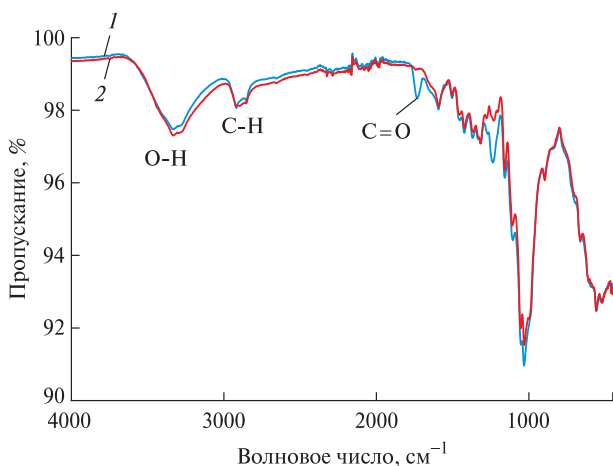


Рис. 3. ИК-спектры шпона бука до (1) и после осветления (2) в диапазоне 4000...500 cm^{-1}

Fig. 3. IR spectra of beech veneer before (1) and after bleaching (2) in the range of 4000...500 cm^{-1}

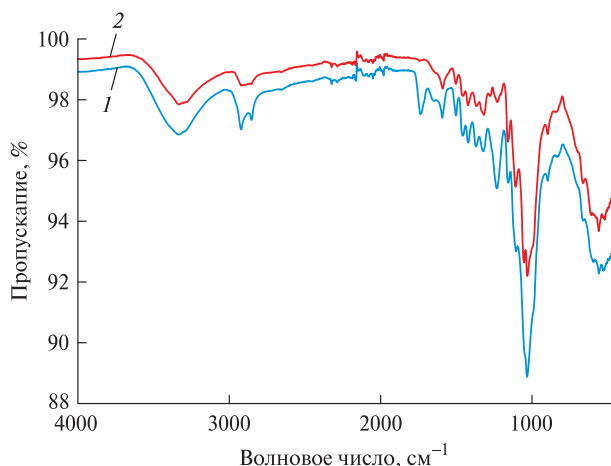


Рис. 5. ИК-спектры шпона клена до (1) и после осветления (2)

Fig. 5. IR spectra of maple veneer before (1) and after bleaching (2)

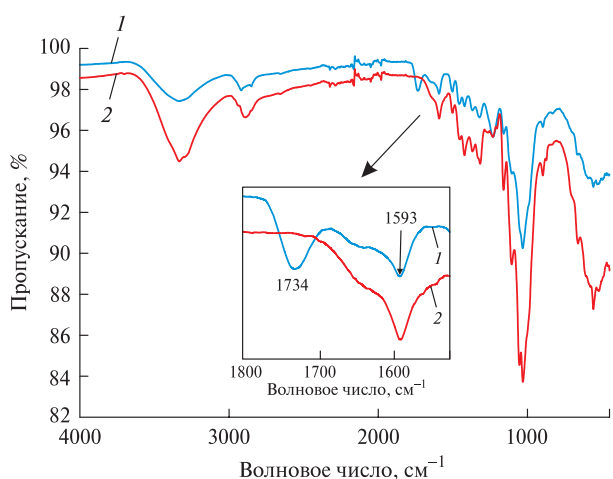


Рис. 4. ИК-спектры шпона дуба до (1) и после осветления (2) (на врезке фрагмент спектров в диапазоне частот 1805...1525 cm^{-1})

Fig. 4. IR spectra of oak veneer before (1) and after bleaching (2) (the inset shows a fragment of the spectra in the range of 1805...1525 cm^{-1})

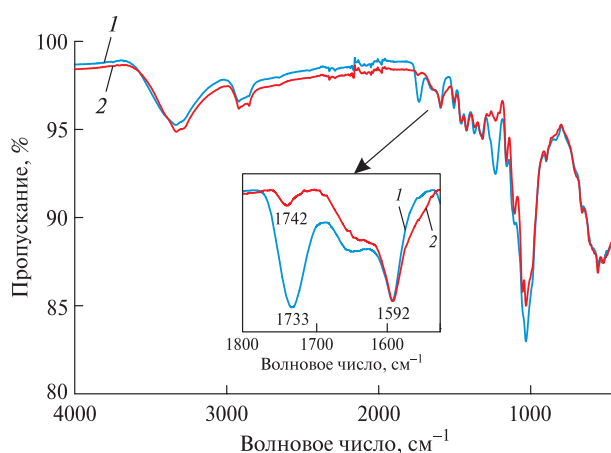


Рис. 6. ИК-спектры шпона ясеня до (1) и после осветления (2) (на врезке фрагмент спектров в диапазоне частот 1805...1525 cm^{-1} , нормированный на интенсивность пика при 1592 cm^{-1})

Fig. 6. IR spectra of ash veneer before (1) and after bleaching (2) (the inset shows a fragment of the spectra in the range of 1805...1525 cm^{-1} , normalized to the intensity of the peak at 1592 cm^{-1})

ную интенсивность в спектрах всех четырех образцов имеет пик 1, а минимальную — пик 5 (для дуба, клена и ясеня) или пик 4 (для бука). После обработки концентрация карбонилсодержащих компонентов резко уменьшается — в основном благодаря компонентам, которые в ИК-спектрах проявляются при частотах выше 1700 cm^{-1} . В осветленном дубовом шпоне эфирные и кислотные карбонилсодержащие компоненты практически полностью исчезают. В тех случаях, где эти компоненты сохраняются, относительные вклады карбонильных групп

разных сортов изменяются (см. табл. 1). Расположение компонент было зафиксировано при таких волновых числах, как 1754 (1), 1732 (2), 1710 (3), 1681 (4) и 1666 (5) cm^{-1} (см. текст). В круглых скобках указан номер пика, соответствующий номеру пика на рис. 8, декомпозиции выполнена согласно методике [25].

В работе [36] предложена методика оценки содержания лигнина в древесине с использованием отношения интенсивностей полос поглощения приблизительно при частотах 1505 и 1157 cm^{-1} согласно уравнению

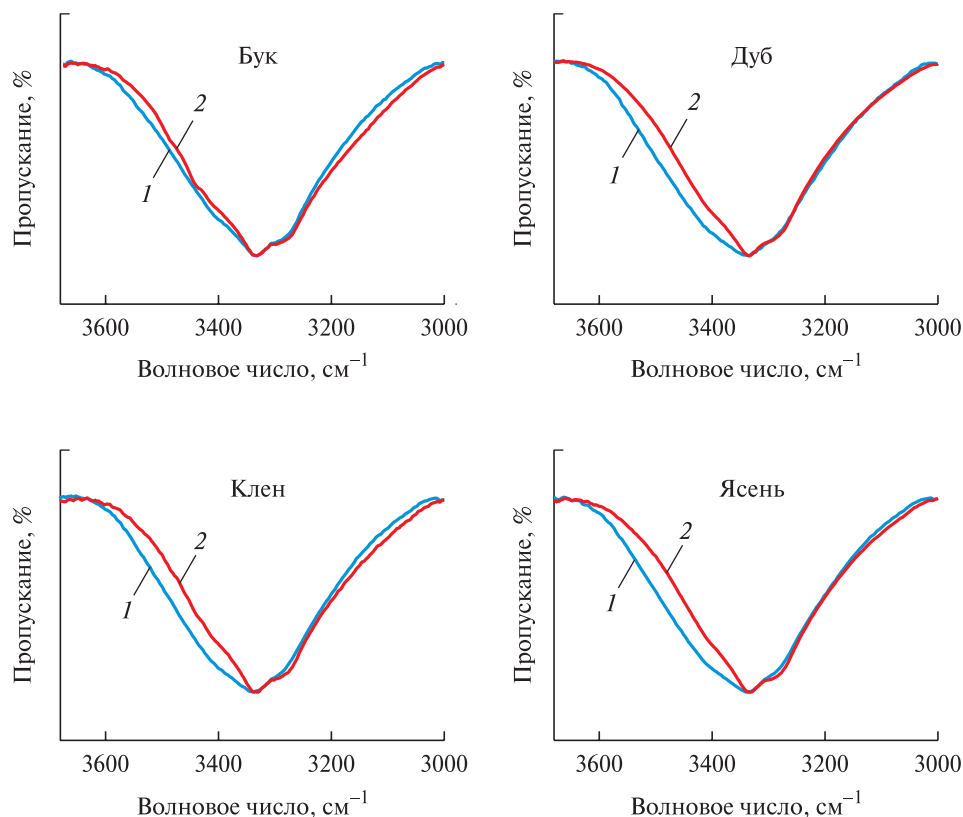


Рис. 7. Полосы поглощения, обусловленные валентными колебаниями связей О-Н, на ИК-спектрах бука, дуба, клена и ясеня до (1) и после (2) процедуры осветления
Fig. 7. Absorption bands due to stretching vibrations of O-H bonds in the IR spectra of beech, oak, maple and ash before (1) and after (2) the bleaching procedure

Т а б л и ц а 1

**Относительные интенсивности (в процентах)
компонент Гаусса — Лоренца**

Relative intensities (in per cent) of Gauss — Lorentz components

Образец шпона	Пик 1	Пик 2	Пик 3	Пик 4	Пик 5
Бук исходный	29,3	28,6	21,6	9,8	10,8
Дуб исходный	37,9	24,6	16,8	11,6	9,1
Клен исходный	36,5	24,0	19,4	10,1	9,9
Ясень исходный	37,7	26,2	15,9	10,8	9,4
Бук после обработки	1,6	9,0	0,1	8,0	81,3
Дуб после обработки	2,7	0,1	0,0	6,5	90,7
Клен после обработки	7,9	2,5	0,2	8,7	80,6
Ясень после обработки	12,3	3,0	0,3	6,9	77,6

$$\text{Lignin} = 10,7 + 76,3 (I_{1505}/I_{1157}),$$

где Lignin — содержание лигнина в процентах;

I_{1505} — интенсивность полосы поглощения на частоте 1505 см⁻¹;

I_{1157} — интенсивность полосы поглощения на частоте 1157 см⁻¹.

В случае исходных образцов такая оценка дает несколько завышенные результаты (табл. 2), если судить по общепринятым представлениям о том, что содержание лигнина в древесине составляет 15...20 % [37]. Однако оценка указывает однозначно на то, что описанная процедура осветления приводит к уменьшению

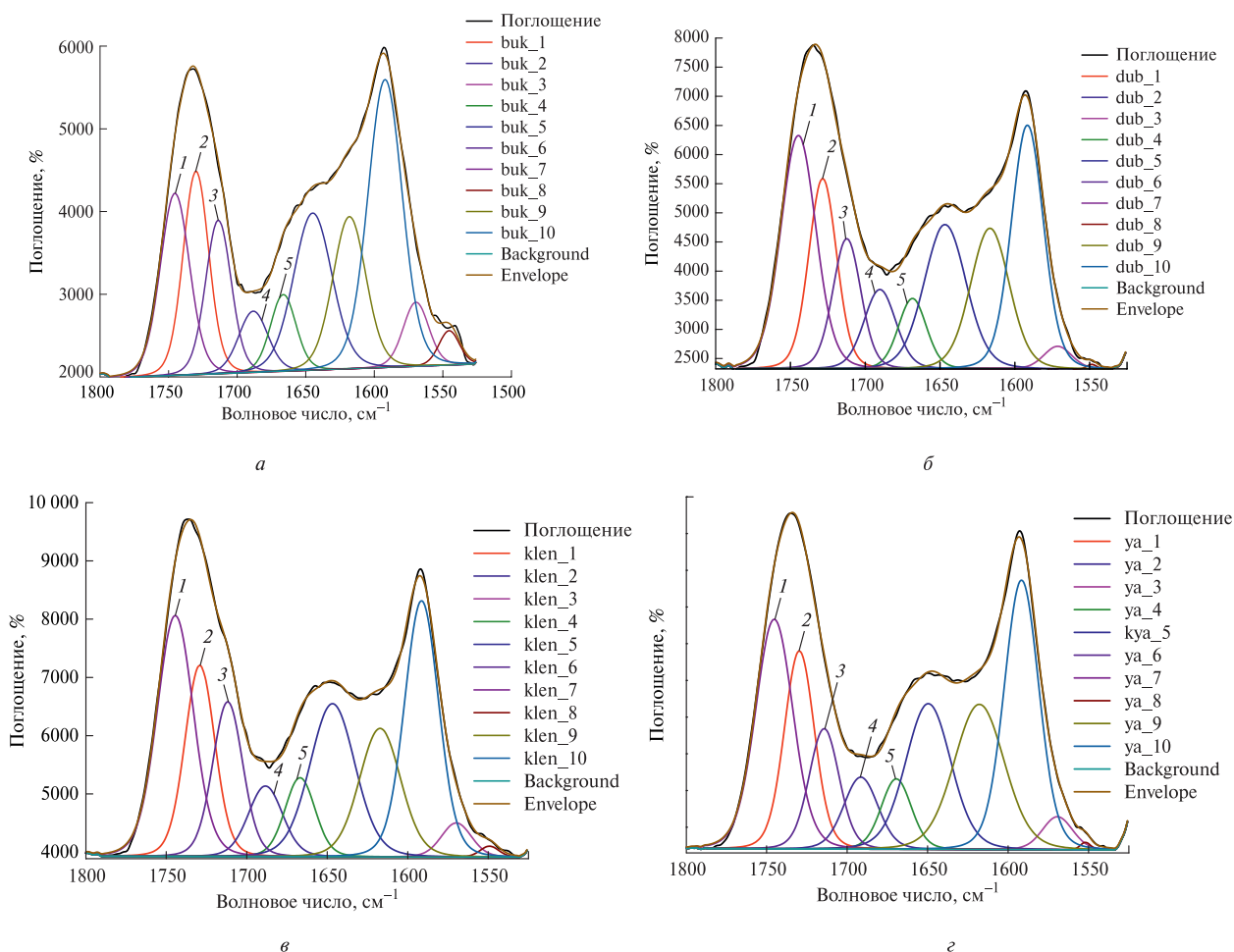


Рис. 8. Декомпозиции фрагмента ИК-спектров исследуемых образцов до осветляющей процедуры в области валентных колебаний связей C=O, проведенный по методике, предложенной в работе [25] (см табл. 1). Спектры представлены после вычитания фона в режиме «Поглощение»: *a* — бук; *б* — дуб; *в* — клен; *г* — ясень

Fig. 8. Decomposition of a fragment of IR spectra of the studied samples before the brightening procedure in the valence vibrations of C=O bonds, carried out according to the technique proposed in [25] (see Table 1). The spectra are presented after background subtraction in the «Absorption» mode: *a* — beech; *б* — oak; *в* — maple; *г* — ash

содержания лигнина в древесине. Более того, она соответствует другим оценкам, согласно которым максимальная потеря лигнина происходит у шпона из дуба, а минимальна — у шпона из ясеня.

Интересно было сравнить оценку из ИК-спектров с результатами определения остаточного лигнина по Класону [38–39], которая была проведена для букового шпона согласно ГОСТ 11960–79 «Полуфабрикаты волокнистые и сырье из однолетних растений для целлюлозно-бумажного производства. Метод определения лигнина». Она оказалась равной 3,75 %. Оценки практически совпали (см. табл. 2). Следовательно, оценка из ИК-спектров правильно отражает тенденцию делигнификации, а вследствие своей простоты может быть рекомендована для широкого использования.

Данные табл. 2 позволяют сделать вывод о том, что предложенная методика оценки содержания лигнина с использованием ИК-спектроскопии достаточно точная и надежная. В частности, с ее помощью появляется возможность быстро и эффективно оценить степень удаления лигнина из древесины без проведения сложных химических анализов, что особенно важно при разработке новых методов обработки древесины, таких как отбеливание или химическая модификация, где требуется контроль содержания лигнина на различных этапах процесса.

Кроме того, полученные результаты подтверждают эффективность применения данной методики для оценки качества древесины различного происхождения, включая такие твердые породы, как дуб и бук, а также мягкие, как, ясень.

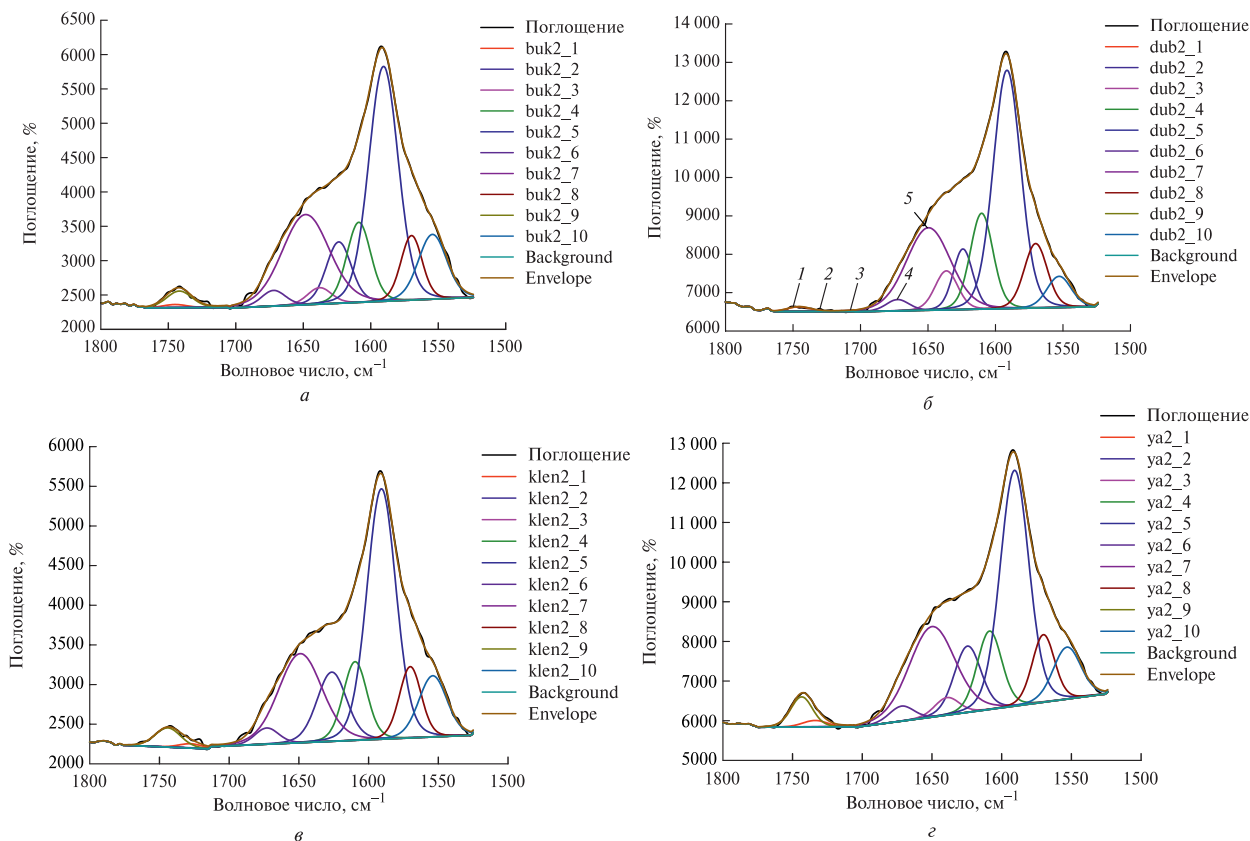


Рис. 9. Декомпозиции фрагмента ИК-спектров исследуемых образцов после осветляющей процедуры в области валентных колебаний связей С=О, проведенный по методике, предложенной в работе [25] (см табл. 1). Спектры представлены после вычитания фона в режиме «Поглощение». Нумерация компонент на всех спектрах такая же как на спектре дуба: *а* — бук; *б* — дуб; *в* — клен; *г* — ясень

Fig. 9. Decomposition of the fragment of IR spectra of the studied samples after the brightening procedure in the valence vibrations of C=O bonds, carried out according to the technique proposed in [25] (see Table 1). The spectra are presented after background subtraction in the «Absorption» mode. The numbering of components in all spectra is the same as in the spectrum of oak: *a* — beech; *b* — oak; *v* — maple; *z* — ash

Т а б л и ц а 2

Положение и интенсивности полос поглощения при частотах приблизительно 1505 и 1157 см⁻¹ в ИК-спектрах исследуемых образцов и содержание лигнина

Position and intensity of absorption bands at approximately 1505 and 1157 cm⁻¹ in the IR spectra of the studied samples and lignin content

Шпон	Этапы осветления	1505 см ⁻¹	1157 см ⁻¹	I ₁₅₀₅ /I ₁₁₅₇	Лигнин, %
Бук	I	1503	1159	0,179	24,4
	II	1503	1159	0,130	20,6
Дуб	I	1502	1160	0,474	46,9
	II	1502	1160	0,062	15,4
Клен	I	1503	1158	0,378	39,5
	II	1503	1159	0,167	23,4
Ясень	I	1505	1158	0,414	42,3
	II	1503	1160	0,146	21,8

Примечание. I — до осветления; II — после осветления.

Таким образом, данная методика может найти широкое применение в деревообрабатывающей промышленности, позволяя оптимизировать процессы обработки древесины и улучшать качество конечной продукции.

Выводы

Описанный процесс осветления существенно изменяет ИК-спектры шпонов бука, дуба, клена и ясеня. В результате осветления центр тяжести полосы поглощения, обусловленной валентными колебаниями связей О-Н, смещается в сторону более низких волновых чисел. Это означает, что при осветлении из шпона удаляются компоненты со слабыми водородными связями. Подтвержден известный из литературы эффект уменьшения в осветленной древесине концентрации компонент, имеющих в своем составе карбонильные группы, которые проявляются в ИК-спектре в виде полос поглощения с максимумом при частотах 1743...1733 см⁻¹. Проведена декомпозиция этой полосы поглощения на компоненты, связанные с ароматическими и алифатическими эфирами, полилактуроновой кислотой, сопряженными и *p*-замещенными α -ароматическими кетонами, с определением относительных долей этих компонент как в исходном, так и в осветленном состоянии для четырех типов шпонов. С использованием интенсивностей отдельных полос поглощения проведены оценки содержания лигнина в древесине. Установлено, что оценка выделившегося лигнина при описанном способе осветления по Класону практически совпадает с такой, проведенной на основе измерения интенсивности пиков при частотах 1505 и 1157 см⁻¹ в ИК-спектрах.

Прозрачная древесина не уступает по показателям прозрачности, экологичности и токсичности оргстеклу, поливинилхлориду, поликарбонату/пропилену. Прозрачная древесина при этом уступает стеклу в прозрачности, а ее производство отличается дороговизной. Тем не менее многофункциональность прозрачной древесины, ее теплозащитные и энергосберегающие свойства, вызывают проведение дальнейших работ.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (номера государственной регистрации 124013000757-0, 124013000692-4 и 124020800013-7) с использованием оборудования Аналитического центра коллективного пользования Федерального исследовательского

центра ПХФ и МХ РАН и Федерального исследовательского центра физики твердого тела РАН в Черноголовке.

Список литературы / References

- [1] Li Y., Fu Q., Yang X., Berglund L. Transparent wood for functional and structural applications // *Phil. Trans. R. Soc. A*, 2018, v. 376, p. 20170182.
- [2] Li Y., Vasileva E., Sychugov I., Popov S., Berglund L. Optically Transparent Wood: Recent Progress, Opportunities, and Challenges // *Adv. Opt. Mater.*, 2018, v. 6, p. 1800059.
- [3] Zhu S., Kumar Biswas S., Qiu Z., Yue Y., Fu Q., Jiang F., Han J. Transparent wood-based functional materials via a top-down approach // *Prog. Mater. Sci.*, 2023, v. 132, p. 101025.
- [4] Kumar A., Jyske T., Petrič M. Delignified Wood from Understanding the Hierarchically Aligned Cellulosic Structures to Creating Novel Functional Materials: A Review // *Adv. Sustain. Syst.*, 2021, v. 5, p. 2000251.
- [5] Hu X. Fabrication, Functionalities and Applications of Transparent Wood: A Review // *Adv. Funct. Mater.*, 2023, v. 33, p. 2303278.
- [6] Wan C., Liu X., Huang Q., Cheng W., Su J., Wu Y. A Brief Review of Transparent Wood: Synthetic Strategy, Functionalization and Applications // *Curr. Org. Synth.*, 2021, v. 18, pp. 615–623.
- [7] Pandit K.H., Goswami A.D., Holkar C.R., Pinjari D.V. A review on recent developments in transparent wood: sustainable alternative to glass // *Biomass Conversion and Biorefinery*. Published by Springer Nature, 2024. DOI: 0.1007/s13399-024-05523-3
- [8] Jele T.B., Andrew J., John M. Sithole Engineered transparent wood composites: a review // *Cellulose*, 2023, v. 30, pp. 5447–5471.
- [9] Mariani A., Malucelli G. Transparent Wood-Based Materials: Current State-of-the-Art and Future Perspectives // *Materials*, 2022, v. 15, p. 9069. DOI: 10.3390/ma15249069
- [10] Кононов Г.Н., Веревкин А.Н., Сердюкова Ю.В., Хвалько Д.Д. Древесина как химическое сырье. История и современность. V. Древесная целлюлоза как природное полимерное сырье. Часть I // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2023. Т. 27. №3. С. 128–142. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-128-142
- [10] Kononov G.N., Verevkin A.N., Serdyukova Yu.V., Koval'ko D.D. *Drevesina kak khimicheskoe syr'e. Istoriya i sovremennost'. V. Drevesnaya tsellyuloza kak prirodnoe polimernoe syr'e. Chast' I* [Wood as chemical raw material. History and modernity. V. Wood pulp as natural polymer raw material. Part I]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 3, pp. 128–142. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-128-142
- [11] Fink S. Transparent wood – A new approach in the functional study of wood structure // *Holzforschung*, 1992, v. 46, no. 5, pp. 403–408. DOI: 10.1515/hfsg.1992.46.5.403
- [12] Jia C., Li T., Chen C., Dai J., Kierzewski I. M., Song J. Scalable, anisotropic transparent paper directly from wood for light management in solar cells // *Nano Energy*, 2017, v. 36, pp. 366–373. DOI: 10.1016/j.nanoen.2017.04.059

- [13] Tang Q., Fang L., Wang Y., Zou M., Guo W. Anisotropic flexible transparent films from remaining wood microstructures for screen protection and AgNW conductive substrate // *Nanoscale*, 2018, v. 10, pp. 4344–4353. DOI: 10.1039/c7nr08367j
- [14] Vasileva E., Li Y., Sychugov I., Mensi M., Berglund L., Popov S. Lasing from organic dye molecules embedded in transparent wood. *Adv. Opt. Mater.*, 2017, v. 5, p. 1700057. DOI: 10.1002/adom.201700057
- [15] Gan W., Xiao S., Gao L., Gao R., Li J., Zhan, X. Luminescent and transparent wood composites fabricated by poly(methyl methacrylate) and γ -Fe₂O₃@YVO₄:Eu³⁺ nanoparticle impregnation // *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 2017, v. 5, pp. 3855–3862. DOI: 10.1021/acssuschemeng.6b02985
- [16] Yu Z., Yao Y., Yao J., Zhang L., Chen Z., Gao Y. Transparent wood containing CsxWO₃ nanoparticles for heat-shielding window applications // *J. Mater. Chem. A*, 2017, v. 5, pp. 6019–6024. DOI: 10.1039/C7TA00261K
- [17] Li T., Zhu M., Yang Z., Song J., Dai J., Yao Y. Wood composite as an energy efficient building material: guided sunlight transmittance and effective thermal insulation // *Adv. Energy Mater.*, 2016, v. 6, p. 1601122. DOI: 10.1002/aenm.201601122
- [18] Xinping Ouyang, Xiangzhen Huang, Tao Ruan, Xueqing Qiu. Microwave-assisted oxidative digestion of lignin with hydrogen peroxide for TOC and color removal. *Water Science & Technology*, 2015, v. 71, no. 3, pp. 390–398. DOI: 10.2166/wst.2014.535
- [19] Liu Y., Chen G., Zhu J., Chen W., Hu W., Liu Y., Fang Z. Preparation, structure and properties of strong, transparent cellulose materials // *Chem. J. Chin. Univ.*, 2018, v. 39, pp. 196–201.
- [20] Wu Y., Wu J., Yang F., Tang C., Huang Q. Effect of H₂O₂ Bleaching Treatment on the Properties of Finished Transparent Wood // *Polymers*, 2019, v. 11, p. 776. DOI: 10.3390/polym11050776
- [21] Chen X., Ge-Zhang S., Han Y., Yang H., Ou-Yang W., Zhu H., Hao J., Wang J. Ultraviolet-Assisted Modified Delignified Wood with High Transparency // *Appl. Sci.*, 2022, v. 12, p. 7406. DOI: 10.3390/app12157406
- [22] Moore A.K., Owen N.L. Infrared Spectroscopic Studies of Solid Wood // *Appl. Spectrosc. Rev.*, 2001, v. 36, pp. 65–86.
- [23] Moosavinejad S.M., Madhoushi M., Vakili M., Rasouli D. Evaluation of degradation in chemical compounds of wood in historical buildings using FT-IR and FT-Raman vibrational spectroscopy // *Maderas-Cienc. Tecnol.*, 2019, v. 21.
- [24] Le D.M., Nielsen A.D., Sørensen H.R., Meyer A.S. Characterisation of Authentic Lignin Biorefinery Samples by Fourier Transform Infrared Spectroscopy and Determination of the Chemical Formula for Lignin // *Bioenergy Res.*, 2017, v. 10, pp. 1025–1035.
- [25] Pappas C., Rodis P., Tarantilis P.A., Polissiou, M. Prediction of the pH in Wood by Diffuse Reflectance Infrared Fourier Transform Spectroscopy // *App. Spectroscopy*, 1999, v. 53, pp. 805–809.
- [26] Evans P.A. Differentiating «hard» from «soft» woods using Fourier transform infrared and Fourier transform spectroscopy // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular Spectroscopy*, 1991, v. 47(9–10), pp. 1441–1447. DOI: 10.1016/0584-8539(91)80235-b
- [27] Sene C., McCann M.C., Wilson R.H., Grinter R. Fourier-Transform Raman and Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (An Investigation of Five Higher Plant Cell Walls and Their Components) // *Plant Physiology*, 1994, v. 106(4), pp. 1623–1631. DOI: 10.1104/pp.106.4.1623
- [28] Costantino H.R., Griebenow K., Langer R., Klibanov A.M. On the pH memory of lyophilized compounds containing protein functional groups. *Biotechnology and Bioengineering*, 1997, v. 53(3), pp. 345–348. DOI: 10.1002/(sici)1097-0290(19970205)53:3<345::aid-bit14>3.0.co;2-j
- [29] Chatjigakis A.K., Pappas C., Proxenia N., Kalantzi O., Rodis P., Polissiou M. FT-IR spectroscopic determination of the degree of esterification of cell wall pectins from stored peaches and correlation to textural changes. *Carbohydrate Polymers*, 1998, v. 37(4), pp. 395–408. DOI: 10.1016/s0144-8617(98)00057-5
- [30] Broda M., Popescu C.-M. The natural decay of archaeological oak wood versus artificial degradation processes — An FT-IR spectroscopy and X-ray diffraction study. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2019, v. 209, pp. 280–287. DOI: 10.1016/j.saa.2018.10.057
- [31] Durmaz S., Özgenç Ö., Boyacı İ. H., Yıldız Ü.C., Erişir E. Examination of the chemical changes in spruce wood degraded by brown-rot fungi using FT-IR and FT-Raman spectroscopy // *Vibrational Spectroscopy*, 2016, v. 85, pp. 202–207. DOI: 10.1016/j.vibspec.2016.04.020
- [32] Åkerholm M., Salmén L. Interactions between wood polymers studied by dynamic FT-IR spectroscopy // *Polymer*, 2001, v. 42(3), pp. 963–969. DOI: 10.1016/s0032-3861(00)00434-1
- [33] Popescu C., Jones D., Kržišnik D., Humar M. Determination of the effectiveness of a combined thermal/chemical wood modification by the use of FT-IR spectroscopy and chemometric methods // *J. of Molecular Structure*, 2019, p. 127133. DOI: 10.1016/j.molstruc.2019.127133
- [34] Bouramdane Y., Fellak S., El Mansouri F., Boukir A. Impact of Natural Degradation on the Aged Lignocellulose Fibers of Moroccan Cedar Softwood: Structural Elucidation by Infrared Spectroscopy (ATR-FTIR) and X-ray Diffraction (XRD). *Fermentation*, 2022, v. 8, p. 698. <https://doi.org/10.3390/fermentation8120698>
- [35] Yang W., Ma W., Liu X. Evaluation of Deterioration Degree of Archaeological Wood from Luoyang Canal No. 1 Ancient Ship // *Forests*, 2024, v. 15, p. 963. <https://doi.org/10.3390/fl15060963>
- [36] Rodrigues J., Faix O., Pereira H. Determination of lignin content of Eucalyptus globulus wood using FTIR spectroscopy // *Holzforschung*, 1998, v. 52, pp. 46–50.
- [37] Sikora A., Kačík F., Gaff M., Vondrová V., Bubeníková T., Kubovský I. Impact of thermal modification on color and chemical changes of spruce and oak wood // *J. of Wood Science*, 2018, v. 64, pp. 406–416.
- [38] Daniel J. Nicholson, Aaron T. Leavitt, Raymond C. Francis. A three-stage klason method for more accurate determinations of hardwood lignin content // *Cellulose Chem. Technol.*, 2014, v. 48, pp. 53–59.
- [39] Abdelrahman N.S., Galiwango E. Klason Method: An Effective Method for Isolation of Lignin Fractions from Date Palm Biomass Waste // *J. of Food Process Engineering*, 2018, v. 57, pp. 46–58.

Сведения об авторах

Баскаков Сергей Алексеевич [✉] — канд. хим. наук, ст. науч. сотр., ФГБУН «Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук», sabaskakov@gmail.com

Баскакова Юлия Владимировна — канд. хим. наук, мл. науч. сотр., ФГБУН «Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук», yuvl@icp.ac.ru

Жарковская Анастасия Вадимовна — инженер, ФГБУН «Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук»

Красникова Светлана Сергеевна — канд. хим. наук, науч. сотр., ФГБУН «Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук»

Кабачков Евгений Николаевич — науч. сотр., ФГБУН «Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук», ФГБУН «Федеральный исследовательский центр физики твердого тела Российской академии наук», Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипяна Российской академии наук (ИФТТ РАН), kabachkov@issp.ac.ru

Шульга Юрий Макарович — канд. хим. наук, вед. науч. сотр., ФГБУН «Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук», yshulga@gmail.com

Поступила в редакцию 03.06.2024.

Одобрено после рецензирования 22.11.2024.

Принята к публикации 17.02.2025.

BLEACHING PROCEDURE OF BEECH, OAK, MAPLE AND ASH VENEERS AND ITS EFFECT ON IR SPECTRA

S.A. Baskakov¹ [✉], Yu.V. Baskakova¹, A.V. Zharkovskaya¹,
S.S. Krasnikova¹, E.N. Kabachkov^{1, 2}, Yu.M. Shulga¹

¹Federal Research Center for Problems of Chemical Physics and Medical Chemistry of the Russian Academy of Sciences, 1, Academician Semenova av., 142432, Chernogolovka, Moscow reg., Russia

²Osipyan Institute of Solid State Physics RAS, 2, Academician Osipyan st., 142432, Chernogolovka, Moscow reg., Russia

sabaskakov@gmail.com


Bleached or transparent wood can ideally be used to replace window glass, as it has greater impact strength, sufficient transparency and low specific gravity. There are also reports of the decorative appeal of bleached wood. Usually, bleaching is carried out using chemical reagents containing chlorites or sulfites. In this work, we used a more environmentally friendly reagent for bleaching such as hydrogen peroxide. The bleaching procedure was carried out for beech, oak, maple and ash veneers. The procedures for impregnating the veneer with epoxy resin and determining the Klason lignin are also described. For all the samples studied, it was found that after bleaching and drying, a decrease in size (shrinkage) occurs in the direction perpendicular to the growth direction. For the first time, using IR spectroscopy, it was found that such bleaching removes components with weak hydrogen bonds from the veneer. Using the decomposition of the IR spectrum fragment in the region of 1800...1500 cm⁻¹, the absorption bands of the stretching vibrations of C=O bonds were isolated and the effect of reducing the concentration of components containing carbonyl groups in the bleached wood was confirmed. It was shown that the efficiency of lignin removal depends significantly on the wood type.

Keywords: veneer, transparent wood, IR spectra, beech, oak, maple, ash

Suggested citation: Baskakov S.A., Baskakova Yu.V., Zharkovskaya A.V., Krasnikova S.S., Kabachkov E.N., Shul'ga Yu.M. *Protседura osvetleniya bukovogo, dubovogo, klenovogo i yasenevogo shponov i ee vliyanie na IK-spektry* [Bleaching procedure of beech, oak, maple and ash veneers and its effect on IR spectra]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 2, pp. 82–93. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-2-82-93

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the state assignment (state registration numbers 124013000757-0, 124013000692-4 and 124020800013-7) using the equipment of the Analytical Centre for Collective Use of the Federal Research Centre of PCF and MH RAS and the Federal Research Centre for Solid State Physics RAS in Chernogolovka.

Authors' information

Baskakov Sergey Alekseevich  — Cand. Sci. (Chem.), Senior Researcher, Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, sabaskakov@gmail.com

Baskakova Yuliya Vladimirovna — Cand. Sci. (Chem.), Junior Researcher, Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, ybaskakova@yandex.ru

Zharkovskaya Anastasiya Vadimovna — Engineer, Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, alperovich.av@phystech.edu

Krasnikova Svetlana Sergeevna — Cand. Sci. (Chem.), Researcher, Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, skras27@mail.ru

Kabachkov Evgeny Nikolaevich — Researcher, Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, Osipyan Institute of Solid State Physics RAS, kabachkov@issp.ac.ru

Shulga Yury Makarovich — Cand. Sci. (Chem.), Leading Researcher, Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, yshulga@gmail.com

Received 03.06.2024.

Approved after review 22.11.2024.

Accepted for publication 17.02.2025.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

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

The authors declare that there is no conflict of interest

БИОПЕРЕРАБОТКА ЛИГНОСУЛЬФОНАТОВ

А.Н. Иванкин✉, А.Н. Зарубина

МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи,
ул. 1-я Институтская, д. 1

aivankin@inbox.ru

Описана методология утилизации лигниновых щелоков путем получения дрожжевой биомассы с использованием продуцента пекарских дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* в ходе осуществления биосинтеза на питательной среде с отходами целлюлозно-бумажной промышленности — лигносульфонатами. Показано, что лигносульфонаты, как продукты переработки древесной биомассы, в процессе их биопереработки могут быть в присутствии дрожжей утилизированы в питательную биомассу, которая представляет собой белковый ингредиент для последующего балансирования, например, животных кормов. Приведен анализ углеводного состава свободных сахаров в лигносульфонатной части исходной питательной среды и показано, что в ней соотношение основных углеводов: арабинозы, галактозы, глюкозы, маннозы, ксилозы, рибозы и лактозы было равным 1 : 1,6 : 1,8 : 6,4 : 12,5 : 0,1 : 0,02, что перспективно для использования продукта в качестве питательного компонента в биотехнологии. Изложена методология ведения биосинтеза. Установлены оптимальные условия ведения процесса с использованием лигносульфонатной культуральной жидкости. Определен оптимальный состав питательной среды, включающей (г/л воды водопроводной): гидрофосфат аммония — 1; дигидрофосфат калия — 2; гидрофосфат калия — 0,1; хлорид калия — 1,5; сульфат магния — 0,5; сульфат аммония — 3; лигносульфонат — 2,5. Показано, что процесс культивирования дрожжей при температуре 35...40 °С и pH 5,0 позволял за 8...10 ч получать суспензию, содержащую 12...15 г/л сырых дрожжевых клеток, которые в дальнейшем можно сепарировать и использовать в практических целях. Изучены аминокислотный и жирнокислотный составы полученной биомассы, что подтвердило высокую биологическую ценность продукта, который может представлять интерес для использования в животноводстве.

Ключевые слова: отходы целлюлозно-бумажной промышленности, лигносульфонаты, пекарские дрожжи *Saccharomyces cerevisiae*, биопереработка

Ссылка для цитирования: Иванкин А.Н., Зарубина А.Н. Биопереработка лигносульфонатов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 2. С. 94–106. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-2-94-106

Растительное сырье вызывает повышенный интерес у исследователей, поскольку является возобновляемым. Оно широко используется в различных отраслях промышленности [1, 2]. Его переработка сопровождается образованием значительного количества отходов. Например, в России, по литературным данным, таких отходов образуется порядка 200 млн м³ в год, из которых перерабатывается не более половины [3, 4].

Сложность биопереработки растительного сырья и получаемых отходов обусловлена их компонентным составом. Основной химический состав сырья растительного происхождения включает в себя целлюлозные полисахариды, лигнин, влагу и минеральные вещества [5–7]. В растительном сырье, также как и в других объектах природного происхождения, содержатся липиды и белок, которые можно использовать на практике в качестве компонентов пищевых систем [8, 9]. Углеводная часть растительного сырья может достаточно успешно

перерабатываться ферментными системами с целлюлазной и гидралазной активностями, на чем, основана вся мировая гидролизная промышленность. Лигниновые компоненты представляют собой настоящую проблему для биопереработки [10]. Ввиду наличия сложной, в основном, замещенной ароматической структуры и низкой реакционной способности к деполимеризации, лигниновые структуры с большим трудом ассимилируются в пищевых системах живых организмов [11, 12]. В связи с этим, лигнин является крупным, практически бросовым отходом производств, связанных с глубокой переработкой растительного и, в первую очередь, древесного сырья [13–15].

Лигниновые вещества образуются преимущественно на гидролизных и целлюлозно-бумажных производствах, связанных с глубоким химическим расщеплением биомассы растительного происхождения [16, 17]. При получении бумаги осуществляется сульфитная или сульфатная варка древесной щепы, в ходе которой содержащийся в измельченной древесной

массе лигнин частично преобразуется в лигносульфонаты, которые до настоящего времени не находят эффективного применения [18–20].

В основном, направление использования лигнина и лигносульфонатов как наиболее распространенного ароматического ресурса, сводятся к техническому использованию в качестве биотоплива [21], сорбентов и различных абсорбирующих материалов [22–24], диспергаторов бетона [25] и наполнителей композитов [26–28], а также структурообразователей почв [29]. То есть, имеется в виду и используется энергетическая или экономическая ценность, но не биологическая.

Лигнин и его производные представляют собой природный амфифильный биополимерный материал, который можно получать в неограниченных количествах из постоянно возобновляемого растительного сырья. Он обладает такими благоприятными свойствами, как нетоксичность, разлагаемость и биосовместимость. Производные лигнина проявляют антиоксидантные свойства и способность к поглощению УФ-излучения. Он имеет очень широкие перспективы применения. Однако гетерогенность и ограниченная реакционная способность лигнина являются основными препятствиями для развития его потенциальной ценности, что делает сам лигнин и его производные недоиспользуемым ресурсом биомассы [30, 31].

Практическое применение производных лигнина, как биосовместимого материала, может быть реализовано при получении биоэмульсий, что является достаточно важным фактором для медицины и биотехнологии в случае контакта с живыми системами. Такие эмульсии, стабилизированные микрочастицами или наночастицами, обеспечивают превосходную агрегатную стабильность и пониженное раздражение. Преимущества таких эмульсий делают их очень привлекательными, обеспечивая эффективный подход к реализации максимальной ценности лигнина как биосырья для экологически безопасного приготовления жидких систем. Частицы лигносульфонатов, так же как и самого лигнина, могут способствовать активному эмульгированию небольших компонентов в питательных средах при выращивании микроорганизмов, т. е. способствовать реализации механизма иммобилизации витаминов, аминокислот и моносахаров [31, 46].

Производные лигнина в последнее время все чаще используются в виде антикоррозионных составов при разработке экологически чистых покрытий. В них содержатся важнейшие экстрактивные компоненты, прежде всего, танины (дубильные вещества), представляю-

щие собой группу водорастворимых веществ ароматического характера на основе полифенольных соединений с большим количеством гидроксильных групп и молекулярной массой от 500 до 25 000, которые обладают характерными вяжущими свойствами, что придает им отличные ингибиторные свойства. Высокая защитная эффективность таких «зеленых» ингибиторов» проявляется в отношении многих металлов и сплавов. При их использовании скорость коррозии может снижаться в 8–10 раз, степень защиты может составлять более 80 %. Самовосстанавливающиеся экологически чистые покрытия для антикоррозионного применения обеспечивают более надежную защиту, чем пассивные покрытия, что смягчает загрязнение окружающей среды, возникающее в результате использования покрытий на основе нефтепродуктов. Благодаря своим собственным антикоррозионным свойствам лигнин является эффективным потенциальным предшественником для разработки самовосстанавливающихся антикоррозионных покрытий. Однако структурная жесткость лигнина и отсутствие функций самовосстановления в композиционных покрытиях на основе чистого лигнина препятствуют всестороннему применению лигнина в этой области, а лигносульфонаты могут выступать более подходящими компонентами антикоррозионных систем [30, 47–49].

Химические вещества, входящие в состав лигниновых производных, могут представлять интерес для использования в биотехнологии в качестве составных частей питательной среды. Определенные проблемы при проектировании питательных систем с использованием в качестве сырьевых компонентов лигносульфонатов связаны с дисперсностью в полиэлектролитной среде, поскольку в питательной жидкости содержатся как различные соли, так и нерастворимые фазообразующие частицы.

В последнее время в литературе уделяется достаточно много внимания синтезу различных наночастиц, использование которых позволяет существенно варьировать физико-химические свойства среды. Так, например, в пищевых системах для человека, благоприятная органолептическая восприимчивость пищи оценивается для дисперсности менее 100 мкм. Очевидно, что для микроорганизмов, задействованных в биотехнологии, имеющих номинальные размеры менее 0,2 мкм, проблема дисперсности среды переходит на нано уровень. Наночастицы на основе лигнина обладают огромным потенциалом для различных применений. Синтез сферических гибридных лигниновых наночастиц с настраиваемой

структурой пор осуществляют с использованием других полимерных соединений, например аминокислот, что приводит к образованию термочувствительных полиэлектролитных комплексов. При нагревании такие макрокомплексы подвергаются самосборке в однородные сферические наночастицы с минимальным индексом полидисперсности. Исследования показывают, что формирование наночастиц включает одновременный коллапс и их рост. Во время коллапса наночастицы становятся более компактными, увеличивая свое эластичное поведение и ингибируя коалесценцию, что имеет решающее значение для образования стабильных наночастиц с низкой дисперсностью [50].

Различные способы получения наночастиц приводят к получению систем для инкапсуляции диспергированных в жидкости компонентов. Такие термочувствительные полиэлектролитные комплексы на основе лигнина обеспечивают новое направление в технологиях контролируемого приготовления наночастиц на основе лигнина. Такие наночастицы демонстрируют многообещающий потенциал для практического применения с целью регулируемого инкапсулирования лекарств и физиологически активных компонентов питательных сред [23, 50].

Разработка питательных сред с включением лигносульфонатов для практического применения в биотехнологии предполагает учет роли и влияния неорганических солей. Древесина, как исходное сырье, характеризуется нативной зольностью на уровне 1–2 %. Массовая доля неорганических солей в древесине в виде остатка после сжигания (золы) обычно составляет от 0,2 до 1,5 % абсолютно сухих веществ (АСВ). В то же время состав основных элементов металлов может варьироваться и составлять, мг/кг: Na — 50; Mn — 200; Fe — 200; Ca — 700; Mg — 1500; K — до 3500. Такое природное соотношение биометаллов предопределяет привлекательность такого сырьевого источника в качестве питательной среды для микроорганизмов. Промышленные щелока, содержащие лигносульфонаты, включают в себя все эти природные компоненты с соответствующим составом, кроме натрия или кальция, наличие которых в технических продуктах лигносульфонатов достаточно высокое из-за использования химических веществ в процессе регулирования pH среды [30].

Лигносульфонаты как преобразованные структурные компоненты растений содержат биodeградируемые фрагменты сахаров, которые могут использоваться микроорганизмами в качестве питательных субстратов. Сюда

относятся такие моносахара, как глюкоза, манноза, галактоза, ксилоза и другие структурные аналоги с гликозидными циклами. Причем, моносахара в составе промышленно получаемых лигносульфонатных отходов, содержатся в основном как примеси. Их образование в щелоках в основном обусловлено деградацией целлюлоз. Исходя из этого биотехническая переработка лигносульфонатов представляет интерес с точки зрения решения проблем экологии, в частности утилизации лигнинов в отвалах и потенциального применения бросового сырья для наработки полезной биомассы.

В окружающей природной среде существуют живые организмы, способные разлагать лигнин и его производные — бактерии, грибы и некоторые виды земляных червей. Наиболее активные группы микроорганизмов, разрушающих лигнин, относятся к древоразрушающим базидиомицетам, образующим на древесине белую гниль. Среди грибов, разлагающих древесину в природе, есть и съедобные, прежде всего опята, вешенки и шампиньоны. Грибы как активные биопреобразователи выделяют широкий спектр ферментов, вызывающих дефрагментацию лигниновой структуры с последующей природной утилизацией [30, 31]. Некоторые виды грибов, в частности грибы белой гнили, катализируют полное разложение лигнинов до диоксида углерода и воды. Этот процесс происходит в природе достаточно медленно и приводит к разрушению погибших растений [32].

Бактерии разлагают лигнин не так активно, хотя они сами по себе менее требовательны к условиям культивирования в биотехнологических процессах. Лигнолитические бактерии присутствуют в рубце крупного рогатого скота, способствуя перевариванию одревесневших частей растений растительных компонентов в животных кормах.

В пищевой промышленности широко используются так называемые пекарские дрожжи вида *Saccharomyces cerevisiae*. Они относятся к домену эукариотов подцарства высших грибов класса сахаромицетов. Дрожжи — это мезофильные микроорганизмы с обычным температурным оптимумом роста 35,5 °C и pH от 4,0 до 4,5. В диапазоне температуры 30...36 °C удельная скорость роста клеточной биомассы возрастает прямо пропорционально повышению температуры. При температуре 45...60 °C дрожжи могут инактивироваться, что приводит к их гибели [33, 38].

В биопроцессах, протекающих в природе, микроорганизмы потребляют практически все виды органического сырья природного проис-

хождения. При культивировании штаммов-продуцентов, применяемых в практической биотехнологии, используются разные виды бросового сырья, которые в основном являются отходами сельскохозяйственного производства. Для целевого осуществления процесса биосинтеза в ферментерах обычно требуется использование достаточно эффективных видов сырья, которые представляют повышенный интерес с точки зрения их питательности при активном выращивании клеток микроорганизмов.

Для приготовления питательных сред в биотехнологии используют сырье как минеральное, так и животного или растительного происхождения. В ряде биотехнических процессов применяют также синтетические субстраты, которые специально синтезируют химическим путем. Они не должны содержать вредных примесей, способных задерживать или ингибировать скорость роста микроорганизмов [44].

При выборе сырья необходимо учитывать его влияние на себестоимость продукции, так как в микробиологическом синтезе важное значение имеет стоимость исходных веществ и материалов. В биотехнологии применяют различные виды, как правило, наиболее дешевых отходов. Например, используют продукты переработки кукурузы, различных зерновых и кормовых культур. То есть негодное на пищевые цели вторичное сырье. Питательная ценность такого сырья для микроорганизмов определяется содержащимися в нем биоэлементами, прежде всего углеродом и азотом. Наличие минорных примесей серы и фосфора в питательной среде также повышает их ценность для микроорганизмов, но только в случае реальных концентраций не превышающих порога токсичности.

В качестве источников углерода чаще всего используют простые высокопитательные моноуглеводы (глюкоза, сахароза, лактоза), сложные углеводы, легко деградирующие до моноуглеводов (крахмал, альгинаты) или богатые углеводами натуральные продукты (меласса, кукурузная мука, гидроль и др.), а также жиры и даже вещества, содержащие углеводороды (нефть, парафин, керосин, природный газ, метан и др.).

Источником азота обычно выступают неорганические соли — сульфат аммония, двузамещенный фосфат аммония, аммиак, нитраты, а также мочевины или натуральные продукты — кукурузный экстракт, соевая мука, дрожжевой автолизат и тому подобные виды сельхозсырья [10, 39].

Если необходимо использовать сложные природные вещества или промышленные побочные продукты, они должны быть тщательно

проверены биохимически на пригодность в качестве исходных веществ на ферментационных стендах или в лабораторных условиях. Практика показывает, что технологические свойства, например, мелассы и кукурузного экстракта при хранении улучшаются в результате протекающих в них биохимических и микробиологических процессах. То есть выдержка сырья при определенной, как правило, комнатной температуре приводит к условному гидролитическому распаду компонентов с появлением в сырье дополнительных веществ высокой биологической ценности. Однако слишком длительное хранение, особенно при возможности разбавления (дождевая вода, конденсат пара), ведет к порче исходных продуктов [36, 38, 44, 45].

В научной литературе недостаточно сведений об использовании в биотехнологии лигнина и его производных в качестве субстратов. Наличие доступных и хорошо изученных дрожжевых культур позволяет рассматривать потенциальную возможность их культивирования с использованием отходов целлюлозно-бумажной промышленности, в частности лигносульфонатов.

Цель работы

Цель работы — разработка методологии осуществления биотехнологического процесса переработки бросовых растительных отходов — лигносульфонатов с использованием метода культивирования доступных дрожжевых культур.

Материалы и методы

В качестве основного объекта исследования были использованы отходы целлюлозно-бумажной промышленности — лигносульфонаты по ТУ 13–0281036-029–94, а также дрожжи пекарские вида *Saccharomyces cerevisiae* по ГОСТ 54845.

Лигносульфонатное сырье имеет следующие характеристики: массовая доля сухих веществ 48 %; плотность 0,4 г/см³; массовая доля влаги 3 %; pH 1%-го раствора 4,5; массовая доля сахаров по антрону 8,5 % [34].

Состав углеводов с использованием стандартов сахаров: арабинозы (Ara), галактозы (Gal), глюкозы (Glc), ксилозы (Xyl), маннозы (Man), фруктозы (Fru), рибозы (Rib), сахарозы (Sug) и лактозы (Lac) определяли методом высокоэффективной анионообменной хроматографии [35] на хроматографической системе BioLC

производства Dionex (Германия), включающей в себя: градиентный насос GS50, электрохимический детектор ED50, генератор элюента EG50 Generator с 10 mN NaOH, хроматографический термостат LC25 с колонкой CarboPac PA20 производства Dionex [34].

Аминокислотный анализ, состав жирных кислот и другие физико-химические показатели определяли стандартными методами [34, 36].

Для получения необходимой биомассы дрожжей процесс культивирования осуществляли в лабораторном ферментере при pH 4,5...5,0 и температуре 35...45 °C в питательной среде, содержащей 10 г/л лигносульфоната, 1 г/л сульфата магния и 2 г/л хлорида калия. Поддерживали pH добавлением 10%-го раствора глюкозы и 25%-го раствора гидроксида аммония. Контроль процесса осуществляли спектрофотометрически при длине волны $\lambda = 546$ нм. Пенoгашение обеспечивалось олеиновой кислотой. Необходимую стерилизацию сред с лигносульфонатом осуществляли прогреванием при температуре 105 °C в течение 30 мин.

Результаты и обсуждение

Суть осуществления эксперимента заключалась в установлении возможности эффективного накопления дрожжевой биомассы на бросовом субстрате, т. е. утилизации лигносульфоната в дрожжевой белок, который можно использовать в качестве питательной кормовой добавки.

Для эффективного культивирования дрожжей необходимо наличие в питательной среде достаточного количества ассимилируемых углеводов. При гидролитическом расщеплении древесного сырья из 100 г древесины можно получить до 45 г сахаров, 5 г ксилоолигосахаров и 25 г лигносульфонатов [37].

Практически в результате любого процесса химической переработки древесного или иного растительного сырья происходит образование большого количества лигносульфонатов. Их формирование приводит к получению продукта с достаточно высоким содержанием свободных углеводов. В частности, мы использовали сухой промышленный лигносульфонат, содержащий более 8 % углеводов. Изучение состава свободных углеводов показало, что соотношение основных углеводов Ara : Gal : Glc : Man : Xyl : Rib : Lac было равным 1 : 1,6 : 1,8 : 6,4 : 12,5 : 0,1 : 0,02, что потенциально представляет хорошую основу для использования в качестве питательного компонента при культивировании любых видов дрожжей.

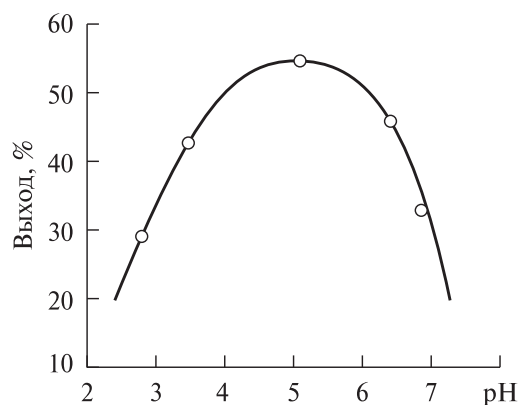


Рис. 1. Зависимость выхода клеточной биомассы пекарских дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* от величины pH (время 6 ч, температура 40 °C)

Fig. 1. Yield dependence of *Saccharomyces cerevisiae* cell biomass on the pH value (time 6 h, temperature 40 °C)

В литературе имеются данные об использовании лигносульфоната для активизации образования активного ила [38]. Было показано, что при культивировании вторичного микробиологического ила в ходе биологической очистки сточных вод на очистных сооружениях, максимальный выход липидных продуктов на уровне 200 мг/г сухих веществ (СВ) достигался в среде, содержащей около 60 мг лигносульфоната на 1 г СВ на четвертые сутки ферментации, против контроля без применения лигносульфонатов на уровне 90 мг/г СВ, т. е. использование незначительного количества лигносульфоната в качестве добавки в питательную среду позволило более чем в 2 раза увеличить выход биомассы и содержащихся в ней целевых веществ [38].

На основании литературных данных было принято решение вводить в питательную среду лигносульфонаты в количестве 2,5 г/л.

Для выращивания культуры *S. cerevisiae* применяли питательную среду с использованием воды водопроводной, содержащую следующие компоненты, г/л: $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ — 1; KH_2PO_4 — 2; K_2HPO_4 — 0,1; KCl — 1,5; MgSO_4 — 0,5; $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ — 3; лигносульфонат — 2,5.

Культивирование проводилось в течение 8 ч при поддержке уровня pH, которое понижали с первоначального значения pH = 6,2 до pH = 5,0. Необходимый уровень pH поддерживали путем дробного добавления раствора глюкозы и аммиака.

На рис. 1 показана зависимость выхода биомассы, оцениваемая по изменению величины оптической плотности культуральной жидкости. Из данных рис. 1 видно, что культивирование дрожжей в присутствии лигносульфонатов происходит с оптимумом pH в районе $5,0 \pm 0,1$, что соответствует литературным данным.

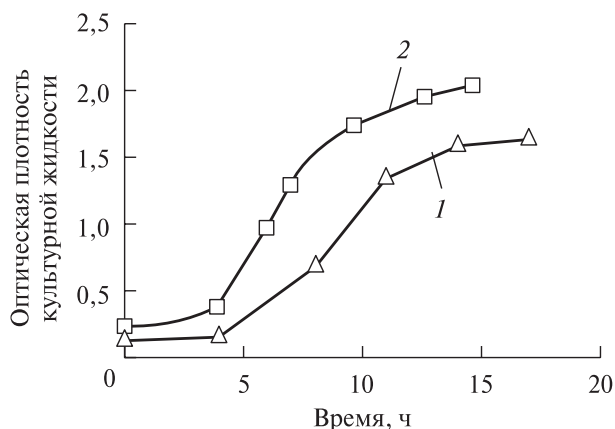


Рис. 2. Выход дрожжевой биомассы в культуральной жидкости (КЖ) во времени в присутствии лигносульфонатов при температуре 40 °С: 1 — эксперимент 1; 2 — повторный эксперимент 2

Fig. 2. Yeast biomass yield in culture liquid (CL) over time in the presence of lignosulfonates at a temperature of 40 °С: 1 — experiment 1; 2 — repeated experiment 2

Температуру ферментации поддерживали на уровне 45 °С, поскольку известно, что снижение температуры роста дрожжей приводит к увеличению выхода в продукте не только белка, но и рибонуклеиновых кислот (РНК) [39]. Увеличение температуры ведет к снижению активности дрожжевых клеток и их гибели. Рост содержания белка можно рассматривать как положительный фактор в случае использования биомассы в кормовых целях, а наличие избыточной РНК может неоднозначно влиять на качество получаемого в дальнейшем корма [40].

На рис. 2 показана зависимость выхода биомассы для двух независимых экспериментов от времени ведения процесса, оцениваемая по превышению оптической плотности среды культуральной жидкости (КЖ) по отношению к исходному состоянию.

Для увеличения выхода биомассы использовали также известный метод подпитки через 6...8 ч путем добавления 10 % по объему свежей среды, содержащей только 2,5 г/л лигносульфонатов и 10 г/л глюкозы. Трехкратное повторение операции позволяло увеличивать выход дрожжевой биомассы более чем в 3,5 раза. В табл. 1 представлены результаты оценки превышения значений оптической плотности среды при $\lambda = 546$ нм по сравнению с началом культивирования дрожжей. Процесс ферментации стимулировали подпиткой через 8 и 16 ч от начала, что позволяло, несмотря на исчерпание питательности культуральной жидкости, обеспечивать относительно равномерное увеличение накопления биомассы. Индекс превышения 3,5 примерно соответствует

Таблица 1

Изменение превышения оптической плотности среды по отношению к исходной культуральной жидкости во времени, усл. ед.
Change in the excess of optical density of the medium in relation to the initial culture liquid over time, conventional units

Эксперимент	Время, ч						
	0	4	8	12	16	20	24
Ферментация в присутствии лигносульфонатов	1,0	0,8	1,7	2,1	2,4	3,3	3,6
Контроль процесса без лигносульфонатов	1,0	0,5	1,3	1,6	1,8	2,2	2,7

Таблица 2

Аминокислотный состав дрожжей, выращенных с использованием лигносульфонатов, в граммах на 100 г белка

Amino acid composition of yeast grown using lignosulfonates, g/100 g protein

Аминокислота	Содержание
Незаменимые	
Валин	5,9
Изолейцин	3,8
Лейцин	6,3
Лизин	5,5
Метионин	1,3
Тирозин	4,6
Треонин	4,6
Триптофан	1,7
Фенилаланин	5,9
Цистин	1,1
Заменимые	
Аланин	7,3
Аргинин	6,2
Аспагагин	9,4
Гистидин	3,7
Глицин	4,9
Глутамин	13,5
Пролин	4,2
Серин	5,7

концентрации сырых клеток 12 г/л. В контрольном варианте осуществляли подпитку путем добавления стерильного раствора глюкозы.

По данным из табл. 1 видно, что использованный режим культивирования пекарских дрожжей *S. cerevisiae* на среде с лигносуль-

Т а б л и ц а 3

**Жи́рноки́слотный состав дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*,
выращенных с использованием лигносульфонатов, % от суммы**
**Fatty acid composition of yeast *Saccharomyces cerevisiae* grown using
lignosulfonates, % of the total**

Наименование жирных кислот	Дрожжи, выращенные на среде, содержащей лигносульфонаты	Дрожжи, выращенные на питательной среде без лигносульфонатов
Капроновая C6:0	0,06	0,07
Каприловая C8:0	0,17	0,21
Каприновая C10:0	0,28	0,18
Ундециловая C11:0	0,06	0,06
Лауриновая C12:0	0,31	0,34
Тридекановая C13:0	0,22	0,22
Миристиновая C14:0	1,26	1,31
Миристолеиновая C14:1	0,27	0,25
Пентадекановая C15:0	0,08	0,11
Цис-10-пентадеценовая C15:1	0,37	0,36
Пальмитиновая C16:0	15,24	16,11
Пальмитолеиновая C16:1	3,42	3,42
Маргариновая C17:0	0,61	0,62
Гептадеценовая C17:1	0,53	0,49
Стеариновая C18:0	7,7	9,33
Олеиновая C18:1	27,1	28,2
Линолевая C18:2 ω6	23,2	21,2
α-Линоленовая C18:3 ω3	1,56	0,47
Нондекановая C19:0	0,45	0,43
Арахидиновая C20:0	0,32	0,33
Арахидононовая C20:4 ω6	0,08	1,13
Тимнодононовая C20:5 ω3	2,23	1,07
Эйкозодиеновая C20:2 ω6	0,35	0,42
Эйкозатриеновая C20:3 ω3	0,18	0,13
Гондоиноновая C20:1 ω9	0,35	0,29
Бегеновая C22:0	0,56	0,63
Докозодиеновая C22:2 ω6	0,09	1,72
Докозагексаеновая C22:6 ω3	0,28	0,14
Эруковая C22:1 ω9	0,32	0,3
Нервоновая C24:1 ω9	0,15	0,22
Лигноцериновая C24:0	0,38	0,77

фонатами позволяет получать культуральную жидкость, содержащую 12...15 г/л клеток дрожжей, а присутствие лигносульфонатов, по-видимому, обеспечивает достаточную питательность среды.

Выполнен аминокислотный анализ белковой части продукта (табл. 2), который практически соответствует описанному в литературе аминокислотному составу дрожжей рода *Saccharomyces cerevisiae* [36]. Использование лигносульфонатов, содержащих ароматические структуры, в качестве компонента питательной среды, очевидно, привело к несколько повышенному содержанию в дрожжевом белке незаменимых ароматических аминокислот:

тирозина, триптофана и фенилаланина, что потенциально увеличило питательную ценность белкового продукта при его использовании в составе кормов для животноводства.

Анализ жирнокислотного состава липидов дрожжей, представленный в табл. 3, показал, что в полученной дрожжевой биомассе содержатся все необходимые жирные кислоты, характерные для дрожжевых культур [41, 42]. В литературе неоднократно отмечался факт зависимости содержания жирных кислот в дрожжевых липидах в зависимости от состава питательной среды, в которой происходит культивирование дрожжей. В данном случае следует отметить, что добавление в питательную

среду лигносульфонатов как отхода целлюлозно-бумажного производства привело к тому, что в жирнокислотном составе дрожжей, массовая доля омега-3 жирных кислот оказалась несколько выше, чем их содержание в биомассе *S. cerevisiae*, выращенной на среде без лигносульфонатов.

В современной теории питания фактор наличия омега-3 жирных кислот отмечается как благоприятный для развития и функционирования живых организмов, особенно к возрастному концу своего существования [43]. Добавление в питательную среду лигносульфонатов, по-видимому, сказалось на характере биосинтеза в дрожжевых клетках в направлении преимущественного образования омега-3 жирных кислот, что может рассматриваться как положительный фактор с точки зрения последующего использования дрожжевого продукта в составе питательных систем.

Полученную культуральную жидкость можно использовать в качестве жидкого кормового продукта. Для получения целевого продукта в твердом состоянии выращенную дрожжевую суспензию подвергали распылительной сушке и получали порошок плотностью 0,6 г/см³ с содержанием белка по Кьельдалю более 65 %.

Основные свойства сухого дрожжевого продукта, полученного с использованием лигносульфонатов могут быть представлены:

Массовая доля белка, %	65,8
Массовая доля липидов, %	8,3
Содержание золы, %	11,2
Содержание влаги, %	12,5.

Достаточно высокая степень содержания белка со сбалансированным наличием всех необходимых для полноценного питания аминокислот, а также благоприятный жирнокислотный состав дрожжевых липидов позволяет оценивать получаемый продукт как достаточно перспективный для дальнейшего получения на его основе питательных композиций.

Выводы

Таким образом, в результате проведенных исследований было показано, что отходы переработки древесной биомассы, образующиеся в процессе получения щелоков в целлюлозно-бумажном производстве, могут быть эффективно переработаны в дрожжевой белок, представляющий интерес, например, для получения животных кормов.

Разработана методология биотехнологического процесса переработки лигносульфонатов с использованием метода глубинного культиви-

рования доступных дрожжевых культур. Определены оптимальные условия ведения процесса. Получен дрожжевой продукт с удовлетворительными физико-химическими характеристиками.


Список литературы

- [1] Wang Y., Lyu B., Fu H., Li J., Ji L., Gong H., Zhang R., Liu J., Yu H. The development process of plant-based meat alternatives: Raw material formulations and processing strategies // *Food Research International*, 2023, v. 167, no. 5, p. 112689. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112689>
- [2] Zhang J., Meng Z., Cheng Q., Li Q., Zhang Y., Li L., Shi A., Wang Q. Plant-based meat substitutes by high-moisture extrusion: Visualizing the whole process in data systematically from raw material to the products // *J. of Integrative Agriculture*, 2022, v. 21, no. 8, pp. 2435–2444. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(21\)63892-3](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(21)63892-3)
- [3] Леонтович В.П. Растительные отходы и перспективы их использования // *Кормопроизводство*, 2010. № 1. С. 44–46.
- [4] Wang Q., Zhang Y., Ma K. Study of the differences in collection scope of raw materials of biomass CHP plants caused by regional factors // *J. of Environmental Management*, 2024, v. 360, no. 6, p. 121106. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121106>
- [5] Zhang K., Zhang W., Xie W., Luo Y., Wei G. Investigation of mechanical properties, chemical composition and microstructure for composite cementitious materials containing waste powder recycled from asphalt mixing plants // *J. of Building Engineering*, 2024, v. 96, no. 11, p. 110362. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.110362>
- [6] Кузнецова Т.Г., Иванкин А.Н., Куликовский А.В. Наносенсорный анализ мясного сырья и растительных объектов. Саарбрюккен: LAP LAMBERT, 2012. 232 с.
- [7] Bouzid H.A., Ibourki M., Hamdouch F., Oubannin S., Asbbane A., Hallouch O., Bijla L., Koubachi J., Majourhat K., Gharby S. Moroccan aromatic and medicinal plants: A review of economy, ethnobotany, chemical composition, and biological activities of commonly used plants // *Food and Humanity*, 2024, v. 2, no. 5. <https://doi.org/10.1016/j.fooHum.2024.100259>
- [8] Vaglica A., Porrello F., Ilardi V., Bruno M. The essential oil chemical composition of a rare ethnopharmacological plant // *Natural Product Research*. 2024, no. 7. <https://doi.org/10.1080/14786419.2024.2377310>
- [9] Иванкин А.Н., Чернуха И.М., Кузнецова Т.Г. О качестве растительных и животных жиров // *Масложировая промышленность*, 2007. № 2. С. 8–11.
- [10] Puss K.K., Paaver P., Loog M., Salmar S. Ultrasound effect on a biorefinery lignin-cellulose mixture // *Ultrasonics Sonochemistry*, 2024, v. 111, no. 12, p. 107071. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.107071>
- [11] Lan H.N., Liu R.Y., Liu Z.H., Li X., Li B.Z., Yuan Y.J. Biological valorization of lignin to flavonoids // *Biotechnology Advances*, 2023, v. 64, no. 5, p. 108107. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2023.108107>

- [12] Pham C.D., Dang M.D.T., Ly T.B., Tran K.D., Vo N.T., Do N.H.N., Mai P.T., Le P.K. A review of the extraction methods and advanced applications of lignin-silica hybrids derived from natural sources // *International J. of Biological Macromolecules*, 2023, v. 230, no. 3, p. 123175. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123175>
- [13] Teo H.L., Wahab R.A., Zainal-Abidin M.H., Mark-Lee W.F., Susanti E. Co-production of cellulose and lignin by Taguchi-optimized one-pot deep eutectic solvent-assisted ball milling pretreatment of raw oil palm leaves // *International J. of Biological Macromolecules*, 2024, v. 280, no. 11, p. 135787. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135787>
- [14] Hou Q., Liu Z., Shi Z., Yang H., Wang D., Yang J. A deep eutectic solvent pretreatment with self-cleaning lignin droplets function to efficiently improve the enzymatic saccharification and ethanol production of bamboo residues // *Industrial Crops and Products*, 2024, v. 216, no. 9, p. 118730. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118730>
- [15] Brienza F., Cannella D., Montesdeoca D., Cybulska I., Debecker D.P. A guide to lignin valorization in biorefineries: traditional, recent, and forthcoming approaches to convert raw lignocellulose into valuable materials and chemicals // *RSC Sustainability*, 2024, v. 2, no. 1, pp. 37–90. <https://doi.org/10.1039/d3su00140g>
- [16] Frias M., Reynoso S., Rambhia S., Noki G., Olson J., Stoeber B., Trajano H.L. Effect of incubation conditions of cellulase hydrolysis on mechanical pulp fibre morphology // *Carbohydrate Polymers*, 2024, v. 344, no. 10, p. 122529. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122529>
- [17] Jia W., Zhou M., Yang C., Zhang H., Niu M., Shi H. Evaluating process of auto-hydrolysis prior to kraft pulping on production of chemical pulp for end used paper-grade products // *J. of Bioresources and Bioproducts*, 2022, v. 7, no. 8, pp. 180–189. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2022.05.002>
- [18] Liu H., Xu S., Li H., He Y. Exploring the dual effect of sodium lignosulfonate-modified LDH treatment and heat processing on elevating corrosion and wear resistance of Ni-W composite coatings // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2024, v. 702, part 2, no. 12, p. 135076. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.135076>
- [19] Demuner I.F., Gomes B.J.B., Gomes J.S., Coura M.R., Borges F.P., Carvalho A.M., Silva C.M. Improving kraft pulp mill sustainability by lignosulfonates production from processes residues // *J. of Cleaner Production*, 2021, v. 317, no. 10, p. 128286. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128286>
- [20] Song Y., Zhong S., Li Y., Dong K., Luo Y., Chu G., Zou H., Sun B. Study on the catalytic degradation of sodium lignosulfonate to aromatic aldehydes over nano-CuO: Process optimization and reaction kinetics // *Chinese J. of Chemical Engineering*, 2023, v. 53, no. 1, pp. 300–309. doi.org/10.1016/j.cjche.2021.12.028
- [21] Wang J., Jiao H., Gao S., Wei J., Yu F., Xie C., Yuan B., Yu S. Potential high-energy-density biofuels from α -pinene and lignin-based phenols via alkylation and subsequent hydrodeoxygenation // *Fuel*, 2024, v. 374, no. 10, p. 132513. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.132513>
- [22] Liang G., Zhang S., Xian Y., Chen L. Depressing molybdenite using calcium lignosulfonate in Cu-Mo flotation separation: Interaction and desorption insights // *Advanced Powder Technology*, 2024, v. 35, no. 11, p. 104665. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2024.104665>
- [23] Stanisław M., Smulek W., Popielski K., Kłapiszewski L., Kaczorek E., Jesionowski T. Sustainable design of lignin-based spherical particles with the use of green surfactants and its application as sorbents in wastewater treatment // *Chemical Engineering Research and Design*, 2021, v. 172, no. 8, pp. 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.chemd.2021.05.028>
- [24] Xu Y., Ding H., Luo C., Zheng Y., Xu Y., Li X., Zhang Z., Shen S., Zhang L. Effect of lignin, cellulose and hemicellulose on calcium looping behavior of CaO-based sorbents derived from extrusion-spherization method // *Chemical Engineering J.*, 2018, v. 334, no. 2, pp. 2520–2529. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.11.160>
- [25] Patel R., Babaei-Ghazvini A., Dunlop M.J., Acharya B. Biomaterials-based concrete composites: A review on biochar, cellulose and lignin // *Carbon Capture Science & Technology*, 2024, v. 12, no. 9, p. 100232. <https://doi.org/10.1016/j.ccsst.2024.100232>
- [26] Yang S., Li Y., Yang Y., Liu R., Zhao Y. Behavior of calcium lignosulfonate under oxygen pressure acid leaching condition // *Hydrometallurgy*, 2024, v. 227, no. 8, p. 106317. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2024.106317>
- [27] Feizi Z.H., Kazzaz A.E., Kong F., Fatehi P. Evolving a flocculation process for isolating lignosulfonate from solution // *Separation and Purification Technology*, 2019, v. 222, no. 9, pp. 254–263. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.04.042>
- [28] Cave G., Fatehi P. Separation of lignosulfonate from spent liquor of neutral sulphite semichemical pulping process via surfactant treatment // *Separation and Purification Technology*, 2015, v. 151, no. 9, pp. 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.07.017>
- [29] Yang J., Xing S., Yang W., Zhang A., Wang W. Application potential of modified waste-lignin as microbial immobilization carriers for improve soil fertility // *Reactive and Functional Polymers*, 2024, v. 196, no. 3, p. 105837. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2024.105837>
- [30] Кононов Г.Н. Дендрохимия. Химия, нанохимия и биогеохимия компонентов клеток, тканей и органов древесных растений, в 2 т. М: МГУЛ, 2015. 1112 с.
- [31] Кононов Г.Н., Веревкин А.Н., Сердюкова Ю.В., Миронов Д.А. Древесина как химическое сырье. История и современность. IV. Делигнификация древесины как путь получения целлюлозы. Часть I // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2022. Т. 26. № 1. С. 97–113. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-1-97-113
- [32] Kiviniemi E., Mikkola A., Mattila H., Wahlsten M., Lundell T. Oxidative stress and culture atmosphere effects on bioactive compounds and laccase activity in the white rot fungus *Phlebia radiata* on birch wood substrate // *Current Research in Microbial Sciences*, 2024, v. 7, p. 100280. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100280>
- [33] Grellet M.A., Dantur K.I., Perera M.F., Ahmed P.M., Castagnaro A., Arroyo-Lopez F.N., Gallego J.B., Welin B., Ruiz M.R. Genotypic and phenotypic characterization of industrial autochthonous *Saccharomyces cerevisiae* for the

- selection of well-adapted bioethanol-producing strains // *Fungal Biology*, 2022, v. 126, no. 10, pp. 658–673. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2022.08.004>
- [34] Иванкин А.Н., Олиференко Г.Л., Куликовский А.В. Аналитическая химия. М.: КНОРУС, 2021. 300 с.
- [35] ГОСТ Р 51880–2002. Определение массовых долей свободных и общих углеводов. Метод высокоэффективной анионной хроматографии. М.: Издательство стандартов, 2002. 12 с.
- [36] Лисицын А.Б., Иванкин А.Н., Неклюдов А.Д. Методы практической биотехнологии. М.: Изд-во ВНИИМП, 2002. 408 с.
- [37] Huang C., Jeuck B., Du J., Yong Q., Chang H., Jameel H., Phillips R. Novel process for the coproduction of xylo-oligosaccharides, fermentable sugars, and lignosulfonates from hardwood // *Bioresource Technology*, 2016, v. 219, no. 11, pp. 600–607. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.08.051>
- [38] Wang Z., Li X., Liu H., Zhou T., Li J., Siddiqui M.A. Enhanced short-chain fatty acids production from anaerobic fermentation of secondary sludge by lignosulfonate addition: Towards circular economy // *J. of Cleaner Production*, 2024, v. 434, no. 1, p. 140252. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140252>
- [39] Меледина Т.В., Давыденко С.Г. Дрожжи *Saccharomyces cerevisiae*. Морфология, химический состав, метаболизм. СПб.: Изд-во Университета ИТМО, 2015. 88 с.
- [40] Косолапов В.М., Чуйков В.А., Худякова Х.К., Косолапова В.Г. Минеральные элементы в кормах и методы их анализа. М.: Угрешская типография, 2019. 272 с.
- [41] Morales-Palomo S., Tomás-Pejó E., González-Fernández C. Phosphate chelation over calcium impacts yeast growth and lipid production from short-chain fatty acids-rich media // *Environmental Technology & Innovation*, 2024, v. 36, no. 11, p. 103767. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103767>
- [42] Huang H., Xu J., Sheng Z., Xie R., Zhang H., Chen N., Li S. Effects of dietary phospholipids on growth performance, fatty acid composition, and expression of lipid metabolism related genes of juvenile hybrid // *Aquaculture Reports*, 2022, v. 22, no. 2, p. 100993. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100993>
- [43] Veerasamy V., Neethirajan V., Singarayar M.S., Balasundaram D., Dharmar P., Thilagar S. Microalgal biomass and lipid synergy for omega fatty acid enrichment: A sustainable source for food supplements & nutraceuticals // *Algal Research*, v. 80, no. 6, p. 103514. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103514>
- [44] Di Caprio F. Cultivation processes to select microorganisms with high accumulation ability // *Biotechnology Advances*, 2021, v. 49, no. 7, p. 107740. doi.org/10.1016/j.biotechadv.2021.107740
- [45] Deive F.J., Sanroman M.A. Bioreactor development for the cultivation of extremophilic microorganisms // *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering. Bioprocesses, Bioreactors and Controls* / Eds. Larroche C. et al. Elsevier, 2017, 816 p. doi.org/10.1016/B978-0-444-63663-8.00014-8
- [46] Xu J., Zhou J., Du B., Li X., Huang Y., Cao Q., Xu S., Wang W. Research progress on the preparation and application of lignin-based Pickering emulsions: A review // *Industrial Crops and Products*, 2024, v. 222, no. 12, p. 119723. doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119723
- [47] Ivankin A.N., Olyferenko G.L. Corrosion inhibition with green polymer systems and natural compounds // *Polymer Science, Series D*, 2024, v. 17, no. 4, pp. 987–994. DOI: 10.1134/S1995421224701697
- [48] Иванкин А.Н., Олиференко Г.Л., Устюгов А.В. Кислотная деградация древесных отходов как способ получения целевых продуктов // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2024. Т. 28. № 4. С. 130–137. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-4-130-137
- [49] Wang J., Seidi F., Shi X., Li C., Huang Y., Xiao H. Unveiling the potential of dual-extrinsic/intrinsic self-healing lignin-based coatings for anticorrosion applications // *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, v. 285, no. 1, p. 138073. doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.138073
- [50] Yin Y., Qin S., Deng S., Li Z., Tang A., Li Q., Liao D., Liu Y. Thermoresponsive lignin-based polyelectrolyte complexes for the preparation of spherical nanoparticles: Application in pesticide encapsulation // *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, v. 288, no. 2, p. 138623. doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.138623

Сведения об авторах

Иванкин Андрей Николаевич  — д-р хим. наук, академик МАН ВШ, профессор кафедры химии и химических технологий лесного комплекса, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), aivankin@bmstu.ru

Зарубина Анжелла Николаевна — канд. техн. наук, зав. кафедрой химии и химических технологий лесного комплекса, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), zarubina@bmstu.ru

Поступила в редакцию 29.10.2024.

Одобрено после рецензирования 19.12.2024.

Принята к публикации 06.02.2025.

LIGNOSULFONATES BIOPROCESSING

A.N. Ivankin[✉], A.N. Zarubina

BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institut'skaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

aivankin@inbox.ru

The lignin liquors recycling method to obtain yeast biomass by using the producer of baker's yeast *Saccharomyces cerevisiae* in the course of biosynthesis on a nutrient medium including waste from the pulp and paper industry such as lignosulfonates is described. It is shown that lignosulfonate, as a product of processing wood biomass, can be utilized in the process of bioprocessing in the presence of yeast into nutritious biomass, which is a protein ingredient for subsequent balancing, for example, of animal feed. Analysis of the carbohydrate composition of free sugars in the lignosulfonate part of the initial nutrient medium showed that the ratio of the main carbohydrates: arabinose, galactose, glucose, mannose, xylose, ribose and lactose was 1 : 1,6 : 1,8 : 6,4 : 12,5 : 0,1 : 0,02, which is likely to be used as a nutrient component in biotechnology. The methodology of biosynthesis was determined, optimal conditions for the process using lignosulfonate culture fluid were found, including (g/l of tap water): ammonium hydrogen phosphate — 1; potassium dihydrogen phosphate — 2; potassium hydrogen phosphate — 0,1; potassium chloride — 1,5; magnesium sulfate — 0,5; ammonium sulfate — 3; lignosulfonate — 2,5. It was shown that the process of yeast cultivation at a temperature of 35...40°C and pH 5,0 allowed obtaining a suspension containing 12...15 g/l of raw yeast cells in 8...10 hours, which can then be separated and used. The study of the amino acid and fatty-acid composition of the biomass confirmed the high biological value of the product, which may be of interest for use in cattle breeding.

Keywords: pulp and paper industry waste, lignosulfonates, baker's yeast *Saccharomyces cerevisiae*, biorefining

Suggested citation: Ivankin A.N., Zarubina A.N. *Biopererabotka lignosul'fonatov* [Lignosulfonates bioprocessing]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 2, pp. 94–106.

DOI: 10.18698/2542-1468-2025-2-94-106

References

- [1] Wang Y., Lyu B., Fu H., Li J., Ji L., Gong H., Zhang R., Liu J., Yu H. The development process of plant-based meat alternatives: Raw material formulations and processing strategies. *Food Research International*, 2023, v. 167, no. 5, p. 112689. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112689>
- [2] Zhang J., Meng Z., Cheng Q., Li Q., Zhang Y., Li L., Shi A., Wang Q. Plant-based meat substitutes by high-moisture extrusion: Visualizing the whole process in data systematically from raw material to the products. *J. of Integrative Agriculture*, 2022, v. 21, no. 8, pp. 2435–2444. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(21\)63892-3](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(21)63892-3)
- [3] Leontovich V.P. *Rastitel'nye otkhody i perspektiva ikh ispol'zovaniya* [Plant waste and prospects for their use]. *Kormoproizvodstvo* [Feed Production], 2010, no. 1, pp. 44–46.
- [4] Wang Q., Zhang Y., Ma K. Study of the differences in collection scope of raw materials of biomass CHP plants caused by regional factors. *J. of Environmental Management*, 2024, v. 360, no. 6, p. 121106. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121106>
- [5] Zhang K., Zhang W., Xie W., Luo Y., Wei G. Investigation of mechanical properties, chemical composition and microstructure for composite cementitious materials containing waste powder recycled from asphalt mixing plants. *J. of Building Engineering*, 2024, v. 96, no. 11, p. 110362. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2024.110362>
- [6] Kuznetsova T.G., Ivankin A.N., Kulikovskiy A.V. *Nanosensorny analiz myasnogo syr'ya i rastitel'nykh ob'ektov* [Nanosensory analysis of meat raw materials and plant objects]. Saarbrücken: LAP LAMBERT, 2012, 232 p.
- [7] Bouzid H.A., Ibourki M., Hamdouch F., Oubannin S., Asbbane A., Hallouch O., Bijla L., Koubachi J., Majourhat K., Gharby S. Moroccan aromatic and medicinal plants: A review of economy, ethnobotany, chemical composition, and biological activities of commonly used plants. *Food and Humanity*, 2024, v. 2, no. 5. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2024.100259>
- [8] Vaglica A., Porrello F., Ilardi V., Bruno M. The essential oil chemical composition of a rare ethnopharmacological plant. *Natural Product Research*. 2024, no. 7. <https://doi.org/10.1080/14786419.2024.2377310>
- [9] Ivankin A.N., Chernukha I.M., Kuznetsova T.G. *O kachestve rastitel'nykh i zhivotnykh zhиров* [On the quality of vegetable and animal fats]. *Maslozhirovaya promyshlennost'* [Oil and Fat Industry], 2007, no. 2, pp. 8–11.
- [10] Puss K.K., Paaver P., Loog M., Salmar S. Ultrasound effect on a biorefinery lignin-cellulose mixture. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2024, v. 111, no. 12, p. 107071. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.107071>
- [11] Lan H.N., Liu R.Y., Liu Z.H., Li X., Li B.Z., Yuan Y.J. Biological valorization of lignin to flavonoids. *Biotechnology Advances*, 2023, v. 64, no. 5, p. 108107. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2023.108107>
- [12] Pham C.D., Dang M.D.T., Ly T.B., Tran K.D., Vo N.T., Do N.H.N., Mai P.T., Le P.K. A review of the extraction methods and advanced applications of lignin-silica hybrids derived from natural sources. *International J. of Biological Macromolecules*, 2023, v. 230, no. 3, p. 123175. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123175>
- [13] Teo H.L., Wahab R.A., Zainal-Abidin M.H., Mark-Lee W.F., Susanti E. Co-production of cellulose and lignin by Taguchi-optimized one-pot deep eutectic solvent-assisted ball milling pretreatment of raw oil palm leaves. *International J. of Biological Macromolecules*, 2024, v. 280, no. 11, p. 135787. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135787>

- [14] Hou Q., Liu Z., Shi Z., Yang H., Wang D., Yang J. A deep eutectic solvent pretreatment with self-cleaning lignin droplets function to efficiently improve the enzymatic saccharification and ethanol production of bamboo residues. *Industrial Crops and Products*, 2024, v. 216, no. 9, p. 118730. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118730>
- [15] Brienza F., Cannella D., Montesdeoca D., Cybulska I., Debecker D.P. A guide to lignin valorization in biorefineries: traditional, recent, and forthcoming approaches to convert raw lignocellulose into valuable materials and chemicals. *RSC Sustainability*, 2024, v. 2, no. 1, pp. 37–90. <https://doi.org/10.1039/d3su00140g>
- [16] Frias M., Reynoso S., Rambhia S., Noki G., Olson J., Stoeber B., Trajano H.L. Effect of incubation conditions of cellulase hydrolysis on mechanical pulp fibre morphology. *Carbohydrate Polymers*, 2024, v. 344, no. 10, p. 122529. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122529>
- [17] Jia W., Zhou M., Yang C., Zhang H., Niu M., Shi H. Evaluating process of auto-hydrolysis prior to kraft pulping on production of chemical pulp for end used paper-grade products. *J. of Bioresources and Bioproducts*, 2022, v. 7, no. 8, pp. 180–189. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2022.05.002>
- [18] Liu H., Xu S., Li H., He Y. Exploring the dual effect of sodium lignosulfonate-modified LDH treatment and heat processing on elevating corrosion and wear resistance of Ni-W composite coatings. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2024, v. 702, part 2, no. 12, p. 135076. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.135076>
- [19] Demuner I.F., Gomes B.J.B., Gomes J.S., Coura M.R., Borges F.P., Carvalho A.M., Silva C.M. Improving kraft pulp mill sustainability by lignosulfonates production from processes residues. *J. of Cleaner Production*, 2021, v. 317, no. 10, p. 128286. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128286>
- [20] Song Y., Zhong S., Li Y., Dong K., Luo Y., Chu G., Zou H., Sun B. Study on the catalytic degradation of sodium lignosulfonate to aromatic aldehydes over nano-CuO: Process optimization and reaction kinetics. *Chinese J. of Chemical Engineering*, 2023, v. 53, no. 1, pp. 300–309. doi.org/10.1016/j.cjche.2021.12.028
- [21] Wang J., Jiao H., Gao S., Wei J., Yu F., Xie C., Yuan B., Yu S. Potential high-energy-density biofuels from α -pinene and lignin-based phenols via alkylation and subsequent hydrodeoxygenation. *Fuel*, 2024, v. 374, no. 10, p. 132513. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.132513>
- [22] Liang G., Zhang S., Xian Y., Chen L. Depressing molybdenite using calcium lignosulfonate in Cu-Mo flotation separation: Interaction and desorption insights. *Advanced Powder Technology*, 2024, v. 35, no. 11, p. 104665. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2024.104665>
- [23] Stanis M., Smulek W., Popielski K., Klapiszewski L., Kaczorek E., Jesionowski T. Sustainable design of lignin-based spherical particles with the use of green surfactants and its application as sorbents in wastewater treatment. *Chemical Engineering Research and Design*, 2021, v. 172, no. 8, pp. 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2021.05.028>
- [24] Xu Y., Ding H., Luo C., Zheng Y., Xu Y., Li X., Zhang Z., Shen S., Zhang L. Effect of lignin, cellulose and hemicellulose on calcium looping behavior of CaO-based sorbents derived from extrusion-spherization method. *Chemical Engineering J.*, 2018, v. 334, no. 2, pp. 2520–2529. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.11.160>
- [25] Patel R., Babaei-Ghazvini A., Dunlop M.J., Acharya B. Biomaterials-based concrete composites: A review on biochar, cellulose and lignin. *Carbon Capture Science & Technology*, 2024, v. 12, no. 9, p. 100232. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2024.100232>
- [26] Yang S., Li Y., Yang Y., Liu R., Zhao Y. Behavior of calcium lignosulfonate under oxygen pressure acid leaching condition. *Hydrometallurgy*, 2024, v. 227, no. 8, p. 106317. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2024.106317>
- [27] Feizi Z.H., Kazzaz A.E., Kong F., Fatehi P. Evolving a flocculation process for isolating lignosulfonate from solution. *Separation and Purification Technology*, 2019, v. 222, no. 9, pp. 254–263. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.04.042>
- [28] Cave G., Fatehi P. Separation of lignosulfonate from spent liquor of neutral sulphite semichemical pulping process via surfactant treatment. *Separation and Purification Technology*, 2015, v. 151, no. 9, pp. 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.07.017>
- [29] Yang J., Xing S., Yang W., Zhang A., Wang W. Application potential of modified waste-lignin as microbial immobilization carriers for improve soil fertility. *Reactive and Functional Polymers*, 2024, v. 196, no. 3, p. 105837. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2024.105837>
- [30] Kononov G.N. *Dendrokimiya. Khimiya, nanokhimiya i biogeokhimiya komponentov kletok, tkaney i organov drevesnykh rasteniy* [Dendrochemistry. Chemistry, nanochemistry and biogeochemistry of components of cells, tissues and organs of woody plants]. In 2 vol. Moscow: MSFU, 2015, 1112 p.
- [31] Kononov G.N., Verevkin A.N., Serdyukova Ju.V., Mironov D.A. *Drevesina kak khimicheskoe syr'e. Istoriya i sovremennost'. IV. Delignifikatsiya drevesiny kak put' polucheniya tsellyulozy. Chast' I* [Wood as chemical raw material. History and modernity. IV. Wood delignification to produce cellulose. Part I]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 1, pp. 97–113. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-1-97-113
- [32] Kiviniemi E., Mikkola A., Mattila H., Wahlsten M., Lundell T. Oxidative stress and culture atmosphere effects on bioactive compounds and laccase activity in the white rot fungus *Phlebia radiata* on birch wood substrate. *Current Research in Microbial Sciences*, 2024, v. 7, p. 100280. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100280>
- [33] Grellet M.A., Dantur K.I., Perera M.F., Ahmed P.M., Castagnaro A., Arroyo-Lopez F.N., Gallego J.B., Welin B., Ruiz M.R. Genotypic and phenotypic characterization of industrial autochthonous *Saccharomyces cerevisiae* for the selection of well-adapted bioethanol-producing strains. *Fungal Biology*, 2022, v. 126, no. 10, pp. 658–673. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2022.08.004>
- [34] Ivankin A.N., Oliferenko G.L., Kulikovskiy A.V. *Analiticheskaya himiya* [Analytical chemistry]. Moscow: Knorus, 2021, 300 p.
- [35] GOST R 51880–2002. *Opreделение massovykh doley svobodnykh i obshchikh uglevodov. Metod vysokoeffektivnoy anionnoy khromatografii* [Determination of mass fractions of free and total carbohydrates. High performance anion chromatography method] Moscow: Standards, 2002, 12 p.

- [36] Lisitsyn A.B., Ivankin A.N., Neklyudov A.D. *Metody prakticheskoy biotekhnologii* [Methods of practical biotechnology]. Moscow: VNIIMP, 2002, 408 p.
- [37] Huang C., Jeuck B., Du J., Yong Q., Chang H., Jameel H., Phillips R. Novel process for the coproduction of xylo-oligosaccharides, fermentable sugars, and lignosulfonates from hardwood. *Bioresource Technology*, 2016, v. 219, no. 11, pp. 600–607. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.08.051>
- [38] Wang Z., Li X., Liu H., Zhou T., Li J., Siddiqui M.A. Enhanced short-chain fatty acids production from anaerobic fermentation of secondary sludge by lignosulfonate addition: Towards circular economy. *J. of Cleaner Production*, 2024, v. 434, no. 1, p. 140252. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140252>
- [39] Meledina T.V., Davydenko S.G. *Drozhzhi Saccharomyces cerevisiae. Morfologiya, khimicheskiy sostav, metabolizm.* [Yeast *Saccharomyces cerevisiae*. Morphology, chemical composition, metabolism]. St. Petersburg: ITMO University, 2015, 88 p.
- [40] Kosolapov V.M., Chuikov V.A., Khudyakova H.K., Kosolapova V.G. *Mineral'nye elementy v kormakh i metody ikh analiza* [Mineral elements in feed and methods of their analysis]. Moscow: Ugreshskaya Printing House, 2019, 272 p.
- [41] Morales-Palomo S., Tomás-Pejó E., González-Fernández C. Phosphate chelation over calcium impacts yeast growth and lipid production from short-chain fatty acids-rich media. *Environmental Technology & Innovation*, 2024, v. 36, no. 11, p. 103767. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103767>
- [42] Huang H., Xu J., Sheng Z., Xie R., Zhang H., Chen N., Li S. Effects of dietary phospholipids on growth performance, fatty acid composition, and expression of lipid metabolism related genes of juvenile hybrid. *Aquaculture Reports*, 2022, v. 22, no. 2, p. 100993. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100993>
- [43] Veerasamy V., Neethirajan V., Singarayar M.S., Balasundaram D., Dharmar P., Thilagar S. Microalgal biomass and lipid synergy for omega fatty acid enrichment: A sustainable source for food supplements & nutraceuticals. *Algal Research*, v. 80, no. 6, p. 103514. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103514>
- [44] Di Caprio F. Cultivation processes to select microorganisms with high accumulation ability. *Biotechnology Advances*, 2021, v. 49, no. 7, p. 107740. doi.org/10.1016/j.biotechadv.2021.107740
- [45] Deive F.J., Sanroman M.A. Bioreactor development for the cultivation of extremophilic microorganisms. *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering. Bioprocesses, Bioreactors and Controls*. Eds. Larroche C. et al. Elsevier, 2017, 816 p. doi.org/10.1016/B978-0-444-63663-8.00014-8
- [46] Xu J., Zhou J., Du B., Li X., Huang Y., Cao Q., Xu S., Wang W. Research progress on the preparation and application of lignin-based Pickering emulsions: A review. *Industrial Crops and Products*, 2024, v. 222, no. 12, p. 119723. doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119723
- [47] Ivankin A.N., Oliferenko G.L. Corrosion inhibition with green polymer systems and natural compounds. *Polymer Science, Series D*, 2024, v. 17, no. 4, pp. 987–994. DOI: 10.1134/S1995421224701697
- [48] Oliferenko G.L., Ivankin A.N., Ustyugov A.V. *Kislotnaya degradatsiya drevesnykh otkhodov kak sposob polucheniya tselevykh produktov* [Wood waste acid degradation to obtain target products]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 4, pp. 130–137. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-4-130-137
- [49] Wang J., Seidi F., Shi X., Li C., Huang Y., Xiao H. Unveiling the potential of dual-extrinsic/intrinsic self-healing lignin-based coatings for anticorrosion applications. *International J. of Biological Macromolecules*, 2025, v. 285, no. 1, p. 138073. doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.138073
- [50] Yin Y., Qin S., Deng S., Li Z., Tang A., Li Q., Liao D., Liu Y. Thermoresponsive lignin-based polyelectrolyte complexes for the preparation of spherical nanoparticles: Application in pesticide encapsulation. *International J. of Biological Macromolecules*, 2025, v. 288, no. 2, p. 138623. doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.138623

Authors' information

Ivankin Andrey Nikolayevich✉ — Dr. Sci. (Chem.), Member of The International Higher Education Academy Of Sciences (IHEAS), Professor of the Department of Chemistry BMSTU (Mytishchi branch), aivankin@bmstu.ru

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

Received 29.10.2024.

Approved after review 19.12.2024.

Accepted for publication 06.02.2025.

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

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОДУКТА БИОТРАНСФОРМАЦИИ ЛИСТОВОГО ОПАДА БАЗИДИАЛЬНЫМИ ГРИБАМИ

А.Н. Веревкин[✉], Г.Н. Кононов

МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи,
ул. 1-я Институтская, д. 1

verevkin@bmstu.ru

Рассмотрена возможность использования продукта биотрансформации листового опада базидиальными грибами в качестве белковых кормовых добавок. Отмечается, что для биотрансформации углеводов растительных отходов используют различные микроорганизмы — бактерии, дрожжи, актиномицеты и грибы. Проанализированы методы биоконверсии целлюлозо-лигнинных материалов. Дана характеристика базидиальных грибов, использующихся для биотрансформации растительного сырья. Охарактеризованы отдельные представители дереворазрушающих грибов, их ферментативная система. Показана способность дереворазрушающих грибов питаться за счет прямого ферментативного расщепления лигноцеллюлозного комплекса древесины приводит к изменению компонентного состава продукта биотрансформации растительного сырья. Приведены данные о компонентном составе древесной зелени. Исследован компонентный состав субстрата после культивирования грибов *Pleurotus ostreatus*. Установлено содержание необходимых компонентов в листовом опаде для развития грибов *Pleurotus ostreatus* (вешенки обыкновенной). В процессе культивирования грибы утилизируют экстрактивные вещества и легкогидролизуемые полисахариды субстрата. После культивирования грибов *Pleurotus ostreatus* в субстрате уменьшается общее содержание экстрактивных веществ, общее содержание полисахаридов в результате биотрансформации уменьшается на 20 %, а лигнинных веществ на 16 %. Содержание минеральных веществ практически не изменяется. Установлено присутствие в субстрате железа, меди и кальция. Отмечено, что в процессе культивирования происходит их усвоение телом гриба *Pleurotus ostreatus* с последующим снижением их содержания в продукте биодegradации листового опада. Содержание свинца в продукте биодеструкции штаммом грибов *Pleurotus ostreatus* на листовом опаде березы не превышает допустимый уровень для продуктов и кормовых добавок. Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования опавших листьев березы в качестве биотехнологического сырья.

Ключевые слова: дереворазрушающие грибы, микологически разрушенная древесина, лигноуглеводный комплекс

Ссылка для цитирования: Веревкин А.Н., Кононов Г.Н. Применение продукта биотрансформации листового опада базидиальными грибами // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 2. С. 107–119. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-2-107-119

В настоящее время существует проблема утилизации растительных отходов. Большое количество новых способов переработки отходов не только невыгодные, но и малоэффективные, если исходить из требований экологии. Для переработки отходов часто используют физико-химические технологии, что приводит к побочному загрязнению окружающей среды.

Внимание мирового научного сообщества привлекает рациональное использование возобновляемых природных ресурсов (растительной биомассы) для промышленных целей, к которым можно отнести и промышленные целлюлозосодержащие отходы, и поиск возможных направлений ее переработки [1–4].

К управляемой биотрансформации растительных отходов можно отнести преобразование компонентов растительной массы энзимным или микробиологическим способом в различные полезные вещества и продукты в регулируемых условиях [5–8].

Для биотрансформации углеводов растительных отходов используют различные микроорганизмы — бактерии, дрожжи, актиномицеты и грибы. Продукты биоконверсии широко применяются для питания людей и кормления животных, а также в производстве химикатов, медикаментов и др. [9–13].

Наиболее изучен процесс ферментации, при котором происходит трансформация растворимых субстратов. Процессы ферментации подразделяются следующим образом: по вре-

мени — на периодические и непрерывные; по фазовому состоянию — на глубинные и поверхностные; по наличию кислорода — на аэробные и анаэробные, а также на монокультурные и поликультурные и др. [8].

При производстве белковых кормовых добавок используют различные виды и формы эукариотических организмов (грибов), которые, в частности, применяются для получения антибиотиков, иногда (в некоторых странах) белков пищевого назначения (микопротеинов). Для роста объемов производства продуктов животноводства требуется кормовая база, содержащая белковые тела в значительных количествах, а также витамины и микроэлементы [5]. В рационе сельскохозяйственных животных должен быть сбалансированный корм, удовлетворяющий их потребность в незаменимых аминокислотах, что способствует повышению коэффициента трансформации белков в животноводческую продукцию.

Биомасса эукариотических организмов (грибов) представляет собой полноценную белковую добавку для животных, птиц и рыб. На основе мицелия грибковых микроорганизмов, в частности ксилотрофных базидиомицетов, перспективным является создание белковых и витаминных пищевых добавок для применения их в разных отраслях животноводства [6, 7].

Высшие базидиальные грибы — это перспективный продуцент пищевого и кормового белка, поскольку их мицелий имеет высокий ростовой показатель и содержит большое количество белковых соединений. Содержание незаменимых аминокислот в белке их мицелия приближается к содержанию их в животных белках. Кроме того, грибная биомасса богата витаминами, а содержание нуклеиновых кислот низкое, что делает такие белковые продукты безвредными. Также белковая биомасса грибов богата лизином — основной аминокислотой, содержания которой недостаточно в растительном белке [8].

Плодовые тела некоторых видов ксилотрофных базидиомицетов могут быть использованы как кормовые продукты для сельскохозяйственных животных, так как сельскохозяйственные отходы плохо усваиваются по причине высокого содержания в них лигноцеллюлозных компонентов. Грибы *Pleurotus pulmonarius* и *Pleurotus ostreatus* могут разрушать эти лигноцеллюлозные материалы без предварительной химической или биологической подготовки, а только с помощью своих ферментных систем, содержащих пектиназу, амилазу, ксилоназу, лакказу, тирозиназу, пероксидазу др. После такой энзиматической обработки доступность

субстратов, содержащих лигноцеллюлозные компоненты, значительно повышается [7].

Биоконверсия растительных материалов. Впервые биотрансформацию растительного сырья проводили во время Первой мировой войны. В это время была разработана технология выращивания дрожжей сахаромицетов семейства *Saccharomycetaceae*, рода *Saccharomyces*, вида *cerevisiae* на гидролизатах отходов древесины. Выращенную биомассу дрожжей использовали как добавку к продуктам питания. В настоящее время на основе гидролиза растительного сырья производится более 600 тыс. т сухой массы кормовых дрожжей [14].

В России в 1935 г. началось производство кормовых дрожжей из отходов спиртовой и сахарной промышленности, а также целлюлозных гидролизатов [14].

В 1960-х годах французский ученый А. Шампанья и его сотрудники разработали метод выращивания дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* на средах, содержащих дизельное топливо. Однако получаемая биомасса была загрязнена дизельным топливом, а очистка полученного продукта требовала больших расходов.

В России в середине 1960-х годов началось выращивание дрожжей на очищенных жидких углеводородах [14, 15].

Со временем возникла производственная необходимость получения кормового белка на более дешевых материалах, чем жидкие парафины. В связи с этим были проведены исследования в области получения бактериальной биомассы из метана [4]. Однако с экономической точки зрения было намного выгоднее сначала каталитически окислять метан до метанола, поскольку метанол легко усваивается различными дрожжевыми микроорганизмами и хорошо растворим в воде. В Великобритании налажено производство по получению дрожжевого белка на метилом спирте, изучается возможность производства дрожжевого белка при культивировании микроорганизмов на этиловом спирте [4].

В России и за ее пределами проводятся исследования в области получения белка с помощью автотрофных водородных бактерий. Водородные бактерии представляют собой микроорганизмы, способные окислять молекулярный водород H_2 в присутствии кислорода O_2 . Эта таксономическая группа бактерий включает в себя преимущественно грамотрицательные бактерии родов *Alcaligenes* (*A. eutrophus*, *A. paradoxus*) и *Pseudomonas*. Особенность таких микроорганизмов состоит в том, что они используют окисление водорода как энергетический процесс. В качестве единственного источ-

ника органического углерода они используют диоксид углерода CO_2 , а в качестве источника питания — минеральные соединения [4, 15].

Наряду с указанными разрабатываются и другие методы получения кормового белка из разнообразных отходов. Сырьем для получения дрожжевого белка служат различные целлюлозосодержащие отходы промышленности и сельского хозяйства. Для культивирования микроорганизмов и, соответственно, обогащения белком на измельченных целлюлозных отходах предпочтительнее использовать культуры микроскопических грибов, которые активно разрушают целлюлозу и одновременно накапливают белок. Успехов в этом направлении достиг А.Г. Лобанок (Белоруссия), который использует гриб *Trichoderma viride* и грибы рода *Penicillium*, таким методом получая кормовую добавку, содержащую до 30 % белка [2, 6].

Исследования в области получения кормового белка путем биопереработки отходов лесной и целлюлозной промышленности с помощью дереворазрушающих грибов проводятся в Швеции и Финляндии. В Канаде, в провинции Онтарио, запущен мини завод по переработке на корм древесных отходов с помощью микроскопического гриба *Chaetomium globosum* [16].

Для получения грибного мицелия можно использовать различные виды полисахаридного сырья, например целлюлозу, крахмальные гидролизаты, отходы зерна и т. д. Так, в ГНУ «Институт микробиологии Национальной академии наук Белоруссии» разработан метод получения грибного мицелия путем глубинного культивирования базидиального трутового гриба *Daedaleopsis confragosa* на средах с молочной сывороткой. Из 1 т молочной сыворотки можно получить до 20 кг высушенной измельченной биомассы, содержащей около 50 % белка и некоторые незаменимые аминокислоты [4].

На молочной сыворотке также выращивают съедобный базидиальный гриб *Panus tigrinus* (пилолистник тигровый). Полученный мицелий гриба содержит около 45 % кормового белка, близкого по составу к животным белкам [2].

Республиканское государственное предприятие «Институт микробиологии и вирусологии», Министерство образования и науки Республики Казахстан, рекомендует дрожжи *Candida*, выращенные на зерновых субстратах в качестве белковой добавки к кормам животных. Перед использованием биомассу дрожжей нагревают до 60...70 °С для инактивации дрожжевых клеток, что благотворно влияет на их усвояемость [6, 16].

Проводились исследования о применении микроводорослей в качестве корма. Однако не были получены положительные результаты и

работы были прекращены, поскольку была выявлена низкая усвояемость животными ценных компонентов клеток водорослей [6].

Тем не менее некоторые препараты на основе водорослей могут показать положительный эффект. В Институте микробиологии Академии наук Республики Узбекистан были использованы жидкие препараты водорослей рода *Chlorella* и установлено, что в культуральной жидкости водорослей содержалось определенное количество белка и, кроме того, присутствовали необходимые биологически активные вещества. В этом Институте также проводятся исследования по использованию для кормления сельскохозяйственных животных цианобактерий рода *Spirulina*, обитающих в водоемах Африки [4, 6].

Отмечается, что некоторые микроорганизмы пригодны для получения незаменимых кормовых аминокислот и витаминов. При правильном сочетании всех питательных компонентов в корме животных можно достичь наилучшего результата, а недостаток хотя бы одного из них снижает эффективность питательного препарата [4].

Для биоконверсии растительного сырья используются отходы пищевого промышленного и сельскохозяйственного производств [4–6].

Перечислим наиболее важные направления применения продуктов микробиологической переработки растительных отходов [6, 8]:

- получение протеиновых продуктов из растений для использования при кормлении животных;
- протеинизация целлюлозосодержащих продуктов методом микробиологической ферментации для получения белковой кормовой добавки;
- биотрансформация растительных целлюлозосодержащих отходов в этиловый спирт, как одного из потенциальных источников энергии;
- производство биогаза из растительных и сельскохозяйственных отходов с целью создания безотходных производств в сельском хозяйстве и пищевой промышленности;
- консервирование кормов непосредственно продуктами брожения (силосование).

Биотрансформация сельскохозяйственных отходов — зеленых растений, зерновых и отходов их переработки оказывает значительное влияние на сельскохозяйственное производство, в частности, может способствовать созданию безотходной технологии полного использования растительных отходов, решению проблемы получения белка из местных ресурсов и развитию технологии создания новых источников энергии. Все эти разработки обеспечат защиту окружающей среды от распространения загрязнений [5, 7, 8, 11].

Наиболее перспективным сырьем для ферментативной обработки считаются целлюлозосодержащие материалы, в которых доля нецеллюлозных компонентов мала и которые представляют собой вторичные продукты или отходы крупных производств [9, 10].

Силосование и сенажирование зеленой травяной массы — это методы микробиологического консервирования кормов, широко используемые на практике. Успехи микробиологической промышленности позволяют использовать такую травяную массу в качестве специальной закваски полисахаридов. В процессе силосования развитие определенных видов микроорганизмов на целлюлозосодержащих субстратах приводит к деструкции полисахаридов, приводящей к образованию органических веществ, которые могут усваивать сельскохозяйственные животные. Подобная ситуация возникает при ферментации сена, если использовать соответствующие ферментные препараты при закладке силоса (сена). Аналогичную технологию можно использовать при переработке соломы и других сельскохозяйственных масс [10, 12].

Подобные работы по консервации растительного сырья микробным белком ведутся в ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева». Существуют способы консервации влажного зерна с помощью химических консервантов и хранения влажного зерна (до 30 %) в герметичных емкостях типа траншей в атмосфере CO_2 [13, 17]. Таким образом, применение достижений биотехнологии позволяет более эффективно использовать урожай и сократить количество побочных продуктов и отходов.

Ферментативный гидролиз, представляющий собой расщепление полисахаридов, в частности целлюлозы, происходит под действием микробных внеклеточных целлюлолитических ферментных комплексов. Это медленный и сложный процесс, которому препятствует наличие лигнина и некоторых его гидролизатов в реакционной среде и т. п. [17, 18].

Химический гидролиз — это процесс расщепления углеводной части растений с помощью катализаторов минеральных кислот и щелочей. При обработке растительных отходов сырья кислотой лигнин практически не растворяется, а целлюлоза и гемицеллюлозы гидролизуются. При использовании щелочей в качестве катализаторов происходит частичное расщепление лигнина, не приводящее к полной деструкции целлюлозы и гемицеллюлоз. Это делает их более восприимчивыми к последующему ферментативному разрушению под действием микроор-

ганизмов, способных расти на таком субстрате. Следовательно, комбинация щелочной обработки целлюлозы и ферментативного гидролиза может быть перспективной [15, 19, 20].

Обычно концентрированная соляная кислота (~37...38 %) гидролизует целлюлозу очень медленно, поэтому для ускорения гидролиза используется соляная кислота с более высокой концентрацией (~41...42 %) [20]. Гидролиз концентрированной соляной кислотой характеризуется большим расходом кислоты. Кроме того, технологическому оборудованию требуется прочное кислотостойкое покрытие [9].

Обычно на производствах при гидролизе используется разбавленная серная кислота с концентрацией ~0,4...0,5 %. Гидролиз проводят при температуре 175...190 °С и повышенном давлении (~0,1...0,2 МПа). Этот способ требует большого расхода водяного пара. Выход целлюлозы в реакции гидролиза составляет 46...50 % массы сухого сырья. Существуют технологии гидролиза в реакторах периодического и непрерывного действия. Периодический метод представляет собой стационарный процесс, а непрерывный метод — подвижный. В случае использования непрерывного гидролиза растительного сырья, выход может составить до 53...56 %, а также привести к улучшению качества гидролизованного продукта и снижению затрат на 20...30 % [9, 17].

В настоящее время широко применяется в промышленности перколяционный метод гидролиза, представляющий собой процесс, в котором жидкая фаза проходит через неподвижную твердую фазу, и твердая фаза должна быть полностью погружена в жидкость. Технологии перколяционного гидролиза имеют модификации, согласно которым возможно изменение производительности устройств, а также повышение температуры процесса и снижение расхода кислотного катализатора [8, 17, 21, 22].

Использование базидиальных грибов для биотрансформации растительного сырья. До начала 1970-х годов основное внимание исследований по биодеградации древесных материалов сосредотачивалось на базидиальных грибах, вызывающих гниль древесины. Эти микроорганизмы можно подразделить на три группы: возбудители мягкой, бурой и белой гнили древесины. В последние годы было получено достаточное количество результатов научных исследований о биоконверсии лигнина. В частности, отдельные виды микроорганизмов *Corynebacterium*, *Agrobacterium*, *Pseudomonas*, *Klebsiella*, *Aerobacter* и *Enterobacter* могут использовать лигнин в качестве единственного источника углерода. Так, например, бактерии

штамма *Aerobacterium sp.* разлагают до 98 % древесного лигнина за 5 сут. [18].

Различные виды и формы микроскопических грибов применяются для производства белковых кормовых добавок, богатых витаминами, для получения антибиотиков, в некоторых странах из них получают микопротеины — белки пищевого назначения [17–20].

Сбалансированное кормление животных должно удовлетворять их потребность в незаменимых аминокислотах, вследствие чего будет повышаться коэффициент трансформации белков в животноводческую продукцию. Микробная биомасса является хорошей белковой добавкой для животных, в том числе птиц и рыб. На основе мицелия ксилотрофных базидиомицетов можно создавать витаминные и антиоксидантные премиксы для применения в различных отраслях животноводства [23–25].

Перспективный продуцент белка пищевого и кормового назначения — высшие базидиальные грибы, поскольку они отличаются высоким содержанием белковых соединений и высокими ростовыми показателями. По содержанию незаменимых аминокислот белок грибов приближается к белку животного происхождения. Его биомасса богата витаминами, особенно группы В, содержание нуклеиновых кислот — низкое, что делает грибы безвредными. Вместе с тем белок грибов богат лизином, основной аминокислотой, недостаточно содержащейся в белке зерновых культур [19, 20, 26–30].

Основные представители дереворазрушающих грибов. Дереворазрушающие грибы представляют собой обширную группу микроорганизмов, развивающихся на древесине и участвующих в ферментативном расщеплении лигноцеллюлозного комплекса древесины, т. е. это, собственно, ксилотрофные (питающиеся древесиной) организмы, участвующие в ее разложении. Они имеют важное значение в круговороте веществ и энергии в лесных экосистемах, осуществляя минерализацию древесины и способствуя формированию лесных почв. Вместе с тем дереворазрушающие грибы вызывают гниение древесины (белая и бурая гниль древесины), а также усыхание лесных насаждений. Кроме того, они разрушают круглый лес, пиломатериалы, шпалы и столбы, деревянные конструкции зданий и сооружений, причиняют огромный экономический ущерб, уничтожая в среднем 10...30 % заготавливаемой древесины [11, 12].

Дереворазрушающие грибы имеют уникальную способность питаться за счет прямого ферментативного расщепления лигноцеллюлозного комплекса древесины, что делает их един-

ственной группой организмов, способных к биологическому разложению древесины. Это небольшая по таксономическому разнообразию экологическая группа грибов: 900...1700 видов преимущественно порядков полипоровые или афиллофоровые (*Polyporales*) (57...75 %), и агариковые, или пластинчатые (*Agaricales*) (23...37 %) грибы. Все эти дереворазрушающие грибы относятся к отделу *Basidiomycota*, подотделу *Agaricomycotina* и поэтому имеют общее название — базидиальные дереворазрушающие или базидиальные ксилотрофные грибы [12].

Основными разрушителями древесины являются грибы, относящиеся к классу базидиомицетов. Ксилотрофные базидиомицеты — это микроорганизмы, при развитии которых на древесине образуются крупные плодовые тела (карпофоры), спорообразующий слой которых называют гименофором. Среди них выделяют ксилопаразитов, развивающихся на живой древесине и кустарниках. К ним относятся корневая губка (*Heterobasidion annosum*), паразитирующая на соснах и елях, а также ложный трутовик (*Phellinus igniarius*), развивающийся на лиственных породах древесины, преимущественно на осинах и ивах. Однако большая часть этой группы относится к ксилосапротрофам, микроорганизмам, развивающимся на мертвой древесине. К ним относятся, например, трутовик настоящий (*Fomes fomentarius*), опенок осенний (*Armillariella mellea*) [12, 13].

Дереворазрушающие грибы образуют на поверхности древесины не только «воздушный» мицелий, но и другие вегетативные мицелиальные структуры. Основная форма размножения базидиомицетов — базидиоспоры. Они формируются в спорогенных клетках — базидиях, располагающихся в плодовых телах — базидиомах [12].

Дереворазрушающие грибы в процессе роста увлажняют древесину за счет воды, образующейся при расщеплении целлюлозы. Дереворазрушающие грибы относятся в основном к следующим группам: *Coniophora*, *Tyromyces*, *Zentinus*, *Serpula*, *Gloeophyllum*, *Trametes*, *Pleurotus*, *Schizophyllum* [12].

В процессе освоения древесных тканей дереворазрушающим грибом наблюдается процесс гниения, характер которого зависит от того, какими ферментами дереворазрушающий гриб воздействует на древесину, следовательно, от того, какие компоненты клеточных оболочек и в какой последовательности подвергаются биодеструкции. В начале воздействие дереворазрушающих грибов на древесину не приводит к ее внешним изменениям, а присутствие грибов мицелия в ней можно обнаружить только

под микроскопом. По мере развития грибного мицелия древесина изменяет свой естественный цвет и становится желто-красной, а затем происходит ее побурение. При этом плотность и прочность древесины постепенно снижаются, она становится легкой, мягкой, теряет вязкость. Гниль, вызывающую такие изменения, называют деструктивной [12, 13, 17, 18].

К грибам белой гнили относятся грибы порядка полипоровые (*Polyporales*), или афиллофоровые, отдела базидиомицетов (*Basidiomycota*). При их развитии древесина сохраняет свою форму и волокнистое строение, но при этом происходит осветление ее поверхности вплоть до светло-желтой или белой окраски. Такое биоразрушение древесины сопровождается уменьшением ее прочности и увеличением способности к набуханию. К грибам белой гнили относят, например, сосновую губку. Большинство из полипоровых грибов предпочитает листовенную древесину [12, 13, 17, 18].

Возбудители бурой гнили относятся к отделу базидиомицетов (*Basidiomycota*). Древесина под их воздействием буреет вследствие накопления в ней ароматических органических соединений с хромофорными группами, например хинонов, хинонметидов лигнина (ненасыщенных циклических сопряженных кетонов), карбоксильных групп и устойчивых феноксильных радикалов. Деструкция древесины сопровождается продольным сморщиванием и деформацией клеточных стенок; одновременно древесина становится хрупкой. К типичным возбудителям бурой гнили относят большинство домовых грибов, трутовики Швейница (серно-желтый и окаймленный), листовенничную губку [12].

В процессе развития мягкой гомогенной гнили дереворазрушающие грибы разрушают клеточную стенку древесины, в первую очередь вторичный слой с образованием темноокрашенных (шоколадного цвета) гумусовых веществ. При этом происходит постепенное разрушение внутренней структуры древесины, сопровождающееся трансформацией древесины в консистенцию густой пасты. Мягкую гниль вызывают некоторые аскомицеты — несовершенные грибы. Они разрушают как хвойную, так и листовенную древесину [12, 18].

Грибы белой гнили также способны разрушать широкий спектр таких поллютантов, как полихлорированные фенолы, нитро- и аминзамещенные фенолы, диоксины и т. п. Также они обладают уникальным свойством разлагать полициклические ароматические углеводороды (ПАУ). Например, они могут метаболизировать фенантрен, нафталин, антрацен, флюорантен, флюорен, пирен, бензапирен, бензаантрацен,

хризен, карбазол и мн. др. В отличие от бактерий они могут метаболизировать ПАУ с четырьмя и более конденсированными кольцами. В настоящее время неизвестны ПАУ, полностью устойчивые к деградации грибами белой гнили [12, 18].

Эти грибы, в отличие от утилизации лигнина, не только используют ПАУ как единственный источник углерода и энергии, но способны кометаболизировать их. Полная минерализация ПАУ грибами белой гнили ограничена и составляет, по данным разных авторов [19, 31], от 0,17 до 10 %. Большая часть этих веществ метаболизируется в гидрофильные гидроксированные продукты, например дигидродиолы, хиноны и 2,2'-дифеновую кислоту — продукт расщепления ароматического кольца. Процесс расщепления ПАУ, так же, как и процесс разрушения лигнина, является окислительным и протекает наиболее интенсивно при pH 4,0...5,0 [18].

Современные исследования деградации ПАУ грибами белой гнили направлены на детальное изучение метаболических путей и вовлеченных в них ферментных систем. Способность к утилизации полициклических ароматических соединений этими грибами в основном связывают с их внеклеточной лигнинолитической ферментной системой [18, 19, 31].

Для прикрепления к твердому субстрату и сохранения внеклеточных ферментов вблизи поверхности гифов грибы используют особые структуры — гифальные чехлы, построенные из слизистых полисахаридов предположительно β -1,3-, β -1,6-глюканов [20, 32].

Цель работы

Цель работы — исследование компонентного состава листового опада березы, подверженного биоконверсии базидиальными грибами рода *Pleurotus*, и рассмотрение перспективы применения продукта биотрансформации в качестве кормовых добавок с содержанием белка.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования использовался лиственный опад березы. Пробы объекта исследования были отобраны в октябре 2021 г. (г. Мытищи, Московская область).

Культивирование грибов *Pleurotus ostreatus* осуществляли при температуре 25 °С до полного обрастания субстрата [33, 34].

Исследования химического состава субстратов листового опада до и после культивирования грибами *Pleurotus ostreatus* (вешенка

обыкновенная) проводили с использованием методик, принятых в биохимии и химии древесины.

Определение влажности листового опада проводилось гравиметрическим методом. Анализ основан на высушивании навески листового опада (около 1 г) после биодеструкции в стаканчике для взвешивания (бюксе), стеклянном или алюминиевом, до постоянной массы. Также проводился анализ листового опада березы на зольность. Методы определения зольности основаны на сжигании навески с последующим прокаливанием золы до постоянной массы [33].

Содержание целлюлозы определяли по методу Кюршнера и Хоффера или азотно-спиртовым методом, основанному на обработке листьев спиртовым (этанольным) раствором азотной кислоты. Лигнин нитруется и частично окисляется. Продукты нитрования и окисления растворяются в спирте. Гемиллюлозы гидролизуются (примерно на 2/3). Деструкция целлюлозы под действием азотной кислоты в спиртовой среде по сравнению с водной уменьшается. Предварительного экстрагирования органическими растворителями не требуется, так как экстрактивные вещества удаляются в ходе обработки [20, 35].

Для определения содержания лигнина в листовом опаде березы использовался метод Попова [20, 35]. Наиболее распространенные методы определения лигнина (сернокислотный и солянокислотный) заключаются в обработке листьев концентрированными минеральными кислотами, гидролизующими углеводную часть и переводящими ее в растворимые продукты. При обработке листьев раствором хлорида цинка в соляной кислоте выделяемый лигнин сохраняет свою структуру, легко отделяется от раствора фильтрованием. При этом время анализа значительно сокращается.

Содержание водорастворимых веществ определялось с помощью экстракции в холодной и горячей воде. Также методом экстракции определялось содержание веществ, растворимых в органических растворителях [14, 35].

Определение легкогидролизуемых полисахаридов проводили путем гидролиза сырья 2%-й соляной кислотой в течение 3 ч при кипячении [14, 35].

Для анализа листового опада березы на содержание определенных катионов использовали пробу золы, растворенную в концентрированной соляной кислоте. Полученный раствор анализировали на содержание микроэлементов качественными реакциями на катионы и определяли содержание микроэлементов спектрофотометрическим методом [35, 36].

Результаты и обсуждение

Опавшие листья древесных растений являются благоприятным субстратом для культивирования дереворазрушающих грибов, поскольку в своем составе содержат необходимые для развития компоненты [15, 37].

Т а б л и ц а 1

Компонентный состав лигноуглеводного комплекса в древесине березы, листовом опаде березы и листовом опаде с грибами *Pleurotus ostreatus*

Component composition of the lignocarbohydrate complex in birch wood, birch leaf litter and leaf litter with *Pleurotus ostreatus* fungus

Компонент	Древесина березы	Листовой опад березы	Листовой опад березы с грибами <i>Pleurotus ostreatus</i>
Состав лигноуглеводного комплекса, % (мас.)			
Углеводы	54,6	56,2	34,4
Целлюлоза	40,6	13,5	13,2
Легкогидролизуемые полисахариды	14,0	42,6	21,2
Лигнин	46,0	40,1	23,9

Для оценки возможности использования получаемого грибного продукта был исследован компонентный состав субстрата после биодеструкции (табл. 1). Все расчеты приведены на единицу массы абсолютно сухого сырья. Также проведен сравнительный анализ компонентного состава исходного листового опада с древесной березы. Из представленных в табл. 1 данных видно, что компонентный состав листового опада березы коррелирует с компонентным составом древесины березы: общее содержание углеводов не изменяется. В листовом опаде на 30 % возрастает содержание экстрактивных веществ, а содержание лигниновых веществ снижается на 13 %.

Из табл. 1 видно, что компонентный состав субстрата после биодеструкции представлен как низкомолекулярными, так и высокомолекулярными соединениями. При культивировании происходит изменение биохимического состава субстрата. Убыль содержания компонентов в большей степени связана с конверсией экстрактивных веществ, легкогидролизуемых полисахаридов и лигнина. Листовой опад содержит необходимые для развития компоненты

Т а б л и ц а 2

Содержание растворимых экстрактивных веществ (% , мас.) в древесине березы, листовом опаде березы и листовом опаде с грибами *Pleurotus ostreatus*

The soluble extractive substances content (% , wt.) in birch wood, birch leaf litter and leaf litter with *Pleurotus ostreatus* fungi

Раствор	Древесина березы	Листовой опад березы	Листовой опад березы с грибами <i>Pleurotus ostreatus</i>
Холодная вода	14,3	24,4	21,0
Горячая вода	19,2	24,6	21,1
Спирто-бензольная смесь	1,0	10,7	3,9

Т а б л и ц а 3

Влажность и содержание минеральных веществ (% , мас.) в древесине березы, листовом опаде березы и листовом опаде с грибами *Pleurotus ostreatus*

Moisture and mineral content (% , wt.) in birch wood, birch leaf litter and leaf litter with *Pleurotus ostreatus* fungi

Показатель	Древесина березы	Листовой опад березы	Листовой опад березы с <i>Pleurotus ostreatus</i>
Относительная влажность	9	2,8	1,5
Коэффициент сухости	0,91	0,97	0,91
Зольность	2,45	6,3	9,5

вешенки обыкновенной: полисахариды 42,7 %, лигнинные вещества 40,1 %, минеральные вещества 6,3 %, экстрактивные вещества 3,5 %, основными из которых являются водорастворимые вещества 2,5 %.

В процессе биодеструкции субстрата грибы утилизируют экстрактивные вещества и легкогидролизуемые полисахариды, содержание которых снижается на 30 %. Общее содержание полисахаридов в результате биотрансформации уменьшается на 20 %, а лигнинных веществ на 16 %.

В процессе культивирования *P. ostreatus* происходит уменьшение содержания всех компонентов листовой древесины. Показано, что в

процессе культивирования микромицетов трансформировались преимущественно легкогидролизуемые полисахариды до низкомолекулярных веществ: их содержание снижалось на 30 %. Содержание лигнинных веществ уменьшилось на 16 % по сравнению с исходным субстратом. Таким образом, под действием ферментного комплекса штамма *P. ostreatus* биодеструкции подвергаются как углеводная составляющая сырья, так и лигнинные вещества. Общее содержание веществ лигноуглеводного комплекса в процессе биодеструкции снижается в 1,8 раза. Это свидетельствует о том, что грибной штамм *P. ostreatus* продуцирует комплекс ферментов (целлюлаз и оксидаз), позволяющих ему участвовать в биодеградации веществ лигноуглеводного комплекса и активно утилизировать постэкстракционный остаток листового субстрата.

После культивирования *P. ostreatus* в субстрате значительно уменьшается содержание экстрактивных веществ, их количество сокращается в 1,2 раза, а содержание водорастворимых веществ уменьшается на 3 %, спирторастворимых — на 7 % (табл. 2). Содержание минеральных веществ практически не изменяется (табл. 3).

Важным параметром оценки качества получаемых кормовых добавок является их безопасность по содержанию тяжелых металлов. Тяжелые металлы могут быть токсичными для животных, они обладают биоаккумулятивностью, а также снижают питательность выращенной кормовой продукции [22, 38, 39].

Для оценки качества получаемого продукта биотрансформации был проведен анализ исходного субстрата для культивирования на наличие некоторых тяжелых металлов: свинца, бария, меди и железа, а также кальция.

Для определения наличия различных микроэлементов в золе березового опада подготавливается раствор золы. Затем полученный раствор золы фильтруется и далее исследуется на содержание определенных ионов.

При проведении качественных реакций на содержание микроэлементов, положительные результаты были получены при исследовании раствора на содержание ионов кальция, а также на содержание ионов железа и меди.

Качественные реакции на определение содержания в субстрате ионов свинца и бария оказались отрицательными. Из этого следует, что содержание этих ионов минимальное, либо они отсутствуют.

В золе субстратов присутствуют железо, медь и кальций. В процессе культивирования происходит усвоение микроэлементов телом гриба *Pleurotus ostreatus* с последующим снижением их содержания (табл. 4).

Т а б л и ц а 4
Содержание микроэлементов
в золе листового опада березы
Microelements content in the birch leaf litter ash

Наименование элемента (катиона)	Предел обнаружения микроэлемента, мг/г		Содержание в субстрате, мг/г	
	зола	лиственной опад	до культивирования	после культивирования
Медь Cu ²⁺	4,08·10 ⁻²	5,3·10 ⁻³	7,2	5,8
Железо Fe ³⁺	1,15·10 ⁻²	1,5·10 ⁻³	199,9	166,0
Кальций Ca ²⁺	2,4	3,1·10 ⁻¹	22,0	18,0
Свинец Pb ²⁺	<2,65	<0,34	0,5	0,3
Барий Ba ²⁺	<2,25·10 ⁻¹	<2,9·10 ⁻²	<1,15·10 ⁻²	–

Анализируя данные, представленные в табл. 4, видно, что в золе субстратов присутствуют железо, медь и кальций. В процессе культивирования происходит усвоение этих элементов телом гриба *Pleurotus ostreatus* с последующим снижением их содержания. Содержание свинца в золе листового опада березы составляет меньше предела обнаружения микроэлемента [19, 40].

Содержание свинца в продукте биодеструкции штаммом грибов *P. ostreatus* на листовом опаде березы не превышает допустимого уровня в мясе и мясопродуктах (0,5 и 0,05 мг/кг соответственно), а также в кормах для непродуктивных животных [27, 37, 41–43].

Выводы

В результате проведенного исследования продукта был установлен компонентный состав листового опада березы. Листовой опад содержит все необходимые компоненты для развития грибов *Pleurotus ostreatus*: полисахариды 42,7 %, лигнинные вещества 40,1 %, минеральные вещества 6,3 %, экстрактивные вещества 3,5 %, основными из которых являются водорастворимые 2,5 %.

Установлено, при культивировании грибов *Pleurotus ostreatus* (вешенка обыкновенная) происходит изменение биохимического состава субстрата за счет утилизации в первую очередь растворимых экстрактивных веществ и легкогидролизуемых полисахаридов, содержание которых снижается на 30 % (мас.).

Качественный анализ золы листового опада на содержание микроэлементов показал при-

сутствие железа, меди и кальция и отсутствие ионов свинца и бария.

Содержание металлов в золе субстрата для культивирования грибов *Pleurotus ostreatus* не превышает норм предельно допустимых концентрации.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования продукта биоконверсии опавших листьев березы в качестве белковой кормовой добавки без вреда для сельскохозяйственных животных.

Список литературы

- [1] Зябрева Н.В. Прямая биоконверсия целлюлозосодержащих материалов термофильными анаэробами: дис. ... канд. техн. наук. М., 2001. 197 с.
- [2] Чхенкели В.А. Биоэкологические аспекты изучения и использования биологически активных веществ дереворазрушающего гриба *Coriolus Pubescens* (Shum.: Fr.) Quel: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Иркутск, 2006. 384 с.
- [3] Емцев В.Т., Мишустин Е.Н. Сельскохозяйственная микробиология: учебник для академического бакалавриата. М.: Юрайт, 2019. 197 с.
- [4] Дедков В.Н. Разработка биотехнологии кормового белка из растительного сырья: дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2014. 146 с.
- [5] Бутова С.Н. Биотехнологическая деградация отходов растительного сырья. М.: Россельхозакадемия, 2004. 320 с.
- [6] Емцев В.Т., Мишустин Е.Н. Микробиология. М.: Юрайт, 2018. 428 с.
- [7] Елинов Н.П. Химическая микробиология. М.: Высшая школа, 1989. 448 с.
- [8] Машанов А.И., Величко Н.А., Ташлыкova Е.Е. Биоконверсия растительного сырья. Красноярск: Изд-во Красноярского ГАУ, 2014. 223 с.
- [9] Грачева И.М., Крявова А.Ю. Технология ферментных препаратов. М.: Элевар, 2000. 512 с.
- [10] Клячко Н.Л. Ферменты — биологические катализаторы: основные принципы действия // Соросовский образовательный журнал, 1997. № 3. С. 58–63
- [11] Замолотчиков Д.Г., Грабовский В.И., Курц В.А. Влияние объемов лесопользования на углеродный баланс лесов России: прогнозный анализ по модели СВМ-CFS3 // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2014. № 1. С. 5–18.
- [12] Потыкалова М.В. Пороки древесины. Архангельск: Изд-во САФУ, 2011. 39 с.
- [13] Вережкин А.Н., Кононов Г.Н., Машута Н.П., Сердюкова Ю.В., Воликова А.С. Культивирование дереворазрушающих грибов рода *Phellinus* на древесине березы // Технология и оборудование для переработки древесины: науч. тр. М.: МГУЛ, 2016. Вып. 381. С. 85–88.
- [14] Меледина Т.В., Давыденко С.Г. Дрожжи *Saccharomyces cerevisiae*. Морфология, химический состав, метаболизм. СПб.: Изд-во Университета ИТМО, 2015. 88 с.
- [15] Тарнопольская В.В., Алаудинова Е.В., Миронов П.В. Перспективы использования базидиальных грибов для получения кормовых продуктов // Хвойные бореальной зоны, 2016. Т. 37. № 5–6. С. 338–341.

- [16] Chen B., Perumal P., Illikainen M., Ye G. A review on the utilization of municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash as a mineral resource for construction materials // *J. of Building Engineering*, 2023, v. 71, pp.106–138.
- [17] Рабинович М.Л., Болобова А.В., Кондращенко В.И. Теоретические основы биотехнологии древесных композитов: в 2 кн. Кн. I. Древесина и разрушающие ее грибы / под ред. М.Л. Рабиновича. М.: Наука, 2001. 264 с.
- [18] Семенкова И.Г. Фитопатология. Дереворазрушающие грибы, гнили и патологические окраски древесины (определятельные таблицы). М.: МГУЛ, 2008. 72 с.
- [19] Азаров В.И., Кононов Г.Н., Горячев Н.Л. Изучение компонентного состава микологически разрушенной древесины // *Технология и оборудование для переработки древесины: науч. тр. М.: МГУЛ, 2012. Вып. 358. С. 126–131.*
- [20] Кононов Г.Н. Дендрохимия. Химия, нанохимия и биогеохимия компонентов клеток, тканей и органов древесных растений. Т. I, II. М.: МГУЛ, 2015. 1111 с.
- [21] Мельникова Е.А., Тарченко Т.М., Миронов П.В. Использование глубинной биомассы мицелия *Pleurotus pulmonarius* в качестве посевного материала для выращивания плодовых тел // *Хвойные бореальной зоны*, 2013. Т. 31. № 3–4. С. 97–100.
- [22] Мамаева О.О., Исаева Е.В., Лоскутов С.Р., Плящечник М.А. Компонентный состав продукта биодеструкции опавших листьев базидиальными грибами *Pleurotus pulmonarius* (штамм PP-3.2) // *Химия растительного сырья*, 2021. № 1. С. 277–285.
- [23] Кононов Г.Н., Вережкин 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.
- [24] Вережкин А.Н., Зуева Н.Н., Войводов К.И., Яковлева В.И., Березин И.В. Кинетический механизм многосубстратных обратимых реакций в гетерогенных биокаталитических системах // *Биохимия*, 1986. Т. 51. № 3. С. 395–403.
- [25] Гелес И.С. Древесное сырье — стратегическая основа и резерв цивилизации. Петрозаводск: Изд-во Карельского научного центра РАН, 2007. 499 с.
- [26] Li A.-H., Yuan F.-X., Groenewald M., Bensch K., Yurkov A.M., Li K., Han P.-J., Guo L.-D., Aime M.C., Sampaio J.P., Jindamorakot S., Turchetti B., Inacio J., Fungsin B., Wang Q.-M. Diversity and phylogeny of basidiomycetous yeasts from plant leaves and soil: Proposal of two new orders, three new families, eight new genera and one hundred and seven new species // *Studies in Mycology*, 2020, v. 96, pp. 17–140.
- [27] Маркова М.Е., Урьяш В.Ф., Степанова Е.А., Груздева А.Е., Гришатов Н.В., Демарин В.Т., Туманова А.Н. Сорбция тяжелых металлов высшими грибами и химином разного происхождения в опытах *in vitro* // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия: Биология. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2008. № 6. С. 1118–124.*
- [28] Zhenju B., Xinqi G., Jing Z., Yafang L., Li Y. Antifungal activity of heat-treated wood extract against wood decay fungi // *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2024, v. 193, pp. 1043–1058.
- [29] Wenjing Z., Zhiyang D., Tianyi L., Jianfen L., Jun L. Fermentation with edible mushroom mycelia improves flavor characteristics and techno-functionalities of soybean protein // *Food Bioscience*, 2024, v. 59, pp. 1023–1041.
- [30] Hakan B., Hilal Y., Hale Ö., Candan T., Hyunchae J., Kaichang L., Kimberly M., Hanshu D., Feng X. Purification and characterization of manganese peroxidase from wood-degrading fungus *Trichophyton rubrum* LSK-27 // *Enzyme and Microbial Technology*, 2004, v. 34, pp. 87–92.
- [31] Embacher J., Zeilinger S., Kirchmair M., Luis M., Rodriguez-R., Neuhauser S. Wood decay fungi and their bacterial interaction partners in the built environment — A systematic review on fungal bacteria interactions in dead wood and timber // *Fungal Biology Reviews*, 2023, v. 45, pp. 100–113.
- [32] Du H., Ayouz M., Lv P., Perré P. A lattice-based system for modeling fungal mycelial growth in complex environments // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2018, v. 511, pp. 191–206.
- [33] Азаров В.И., Винославский В.А., Кононов Г.Н. Лабораторный практикум по химии древесины и синтетических полимеров. М.: МГУЛ, 2006. 248 с.
- [34] Йенсен В., Илвессало-Пряффли М.С., Норин Т. Химия древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 399 с.
- [35] Кононов Г.Н. Химия древесины и ее основных компонентов. М.: МГУЛ, 1999. 247 с.
- [36] Алексеев В.Н. Курс качественного химического полумикроанализа. М.: Химия, 1973. 584 с.
- [37] Решетникова И.А., Газарян И.Г., Вережкин А.Н., Фечина В.А., Мирошниченко Т.Г., Егоров А.М. Поиск грибов-продуцентов пероксидазы // *Микробиология и фитопатология*, 1992. Т. 26. № 5. С. 383–387.
- [38] Vitiello L., Salzano de Luna M., Ambrogi V., Filippone G. A simple rheological method for the experimental assessment of the fiber percolation threshold in short fiber biocomposites // *Composites Science and Technology*, 2024, v. 245, pp. 1103–1110.
- [39] Wojno S., Ahlinder A., Altskär A., Stading M., Abitbol T., Kádár R. Percolation and phase behavior in cellulose nanocrystal suspensions from nonlinear rheological analysis // *Carbohydrate Polymers*, 2023, v. 15, pp. 1206–1211.
- [40] Radhika N., Sachdeva S., Kumar M. Lignin depolymerization and biotransformation to industrially important chemicals/biofuels // *Fuel*, 2022, v. 312, pp. 1215–1229.
- [41] Wang Y., Zhang Zh., Fan H., Wang J. Wood carbonization as a protective treatment on resistance to wood destroying fungi // *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2018, v. 129, pp. 42–49.
- [42] Mishra V. Jana A., Jana M., Gupta A. Enhancement in multiple lignolytic enzymes production for optimized lignin degradation and selectivity in fungal pretreatment of sweet sorghum bagasse // *Bioresource Technology*, 2017, v. 236, pp. 49–59.

Сведения об авторах

Веревкин Алексей Николаевич✉ — канд. хим. наук, доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), verevkin@bmstu.ru

Кононов Георгий Николаевич — канд. техн. наук, доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), академик РАЕН, уч. секретарь секции «Химия и химическая технология древесины» РХО им. Д.И. Менделеева, kononov@bmstu.ru

Поступила в редакцию 16.02.2024.

Одобрено после рецензирования 20.09.2024.

Принята к публикации 05.02.2025.

APPLICATION OF THE LEAF LITTER BIOTRANSFORMATION PRODUCT BY BASIDIAL FUNGI

A.N. Verevkin✉, **G.N. Kononov**

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

verevkin@bmstu.ru

The possibility of using the biotransformation product of leaf litter by basidium fungi as protein feed additives is considered. Various microorganisms, such as bacteria, yeast, actinomycetes, and fungi, are used for biotransformation of carbohydrates from plant waste. Methods of bioconversion of cellulose-lignin materials are analyzed. The characteristics of basidium fungi used for biotransformation of raw plant materials are given. Individual representatives species of wood-destroying fungi and their enzymatic system are characterized. The ability of wood-destroying fungi to feed due to direct enzymatic cleavage of the lignocellulose complex of wood is shown to lead to a change in the component composition of the biotransformation product of plant raw materials. Data on the component composition of tree greens are presented. The component composition of the substrate after cultivation of *Pleurotus ostreatus* was investigated. The content of necessary components in leaf litter for the development of *Pleurotus ostreatus* (oyster mushroom) has been established. During cultivation, fungi utilize extractive substances and easily hydrolyzable polysaccharides of the substrate. After cultivation of *Pleurotus ostreatus*, the total content of extractive substances in the substrate decreases, the total content of polysaccharides decreases by 20 % as a result of biotransformation, and lignin substances by 16 %. The mineral content is practically unchanged. The ash of the substrates contains iron, copper and calcium. During cultivation, they are absorbed by the body of the fungus *Pleurotus ostreatus*, followed by a decrease in their content in the biodegradation product of leaf litter. The lead content in the biodegradation product of the *Pleurotus ostreatus* strain on birch leaf litter does not exceed the permissible level for products and feed additives. The obtained results indicate the possibility of using fallen birch leaves as biotechnological raw materials.

Keywords: wood-destroying fungi, mycologically destroyed wood, lignocarbohydrate complex

Suggested citation: Verevkin A.N., Kononov G.N. *Primenenie produkta biotransformatsii listovogo opada bazidial'nyimi gribami* [Application of the leaf litter biotransformation product by basidial fungi]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 2, pp. 107–119. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-2-107-119

References

- [1] Zyabreva N.V. *Pryamaya biokonversiya tsellyulozosoderzhashchikh materialov termo-fil'nyimi anaerobami* [Direct bioconversion of cellulose-containing materials by thermophilic anaerobes]. Diss. Cand. Sci. (Tech.). Moscow, 2001, 197 p.
- [2] Chkhenkeli V.A. *Bioekologicheskie aspekty izucheniya i ispol'zovaniya biologicheskii aktivnykh veshchestv derevorazrushayushchego griba Coriolus Pubescens* (Shum.: Fr.) Quel [Bioecological aspects of the study and use of biologically active substances of the wood-decaying fungus *Coriolus Pubescens* (Shum.: Fr.) Quel.]. Abstract Diss. Dr. Sci. (Biol.). Irkutsk, 2006, 384 p.
- [3] Emtsev V.T., Mishustin E.N. *Sel'skokhozyaystvennaya mikrobiologiya* [Agricultural microbiology]. Moscow: Yurayt, 2019, 197 p.
- [4] Dedkov V.N. *Razrabotka biotekhnologii kormovogo belka iz rastitel'nogo syr'ya* [Development of biotechnology for feed protein from plant raw materials]. Diss. Cand. Sci. (Tech.). Voronezh, 2014, 146 p.

- [5] Butova S.N. *Biotehnologicheskaya degradatsiya otkhodov rastitel'nogo syr'ya* [Biotechnological degradation of waste plant materials]. Moscow: Russian Agricultural Academy, 2004, 320 p.
- [6] Emtsev V.T., Mishustin E.N. *Mikrobiologiya* [Microbiology]. Moscow: Yurayt, 2018, 428 p.
- [7] Elinov N.P. *Khimicheskaya mikrobiologiya*. [Chemical microbiology]. Moscow: High School, 1989, 448 p.
- [8] Mashanov A.I., Velichko N.A., Tashlykova E.E. *Biokonversiya rastitel'nogo syr'ya* [Bioconversion of plant raw materials. Study manual]. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk state agrarian university, 2014, 223 p.
- [9] Gracheva I.M., Kryavova A.Yu. *Tekhnologiya fermentnykh preparatov* [Technology of enzyme preparations]. Moscow: Elevar, 2000, 512 p.
- [10] Klyachko N.L. *Fermenty — biologicheskie katalizatory: osnovnye printsipy deystviya* [Enzymes — biological catalysts: basic principles of action]. Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal [Soros Educational J.], 1997, no. 3, pp. 58–63.
- [11] Zamolodchikov D. G., Grabovsky V. I., Kurts V. A. *Vliyanie ob'emov lesopol'zovaniya na uglerodnyy balans lesov Rossii: prognoznnyy analiz po modeli CBM-CFS3* [The influence of forest use volumes on the carbon balance of Russian forests: forecast analysis using the CBM-CFS3 model]. Trudy Sankt-Peterburgskogo NII lesnogo khozyaystva [Proceedings St. Petersburg scientific research Institute of Forestry], 2014, no. 1, pp. 5–18.
- [12] Potykalova M.V. *Poroki drevesiny* [Defects of wood]. Arkhangel'sk: SAFU, 2011, 39 p.
- [13] Verevkin A.N., Kononov G.N., Mashuta N.P., Serdyukova Yu.V., Volikova A.S. *Kul'tivirovanie derevorazrushayushchikh gribov roda Phellinus na drevesine berezy* [Cultivation of wood-decaying fungi of the genus *Phellinus* on birch wood]. Tekhnologiya i oborudovanie dlya pererabotki drevesiny: nauchnye trudy [Technology and equipment for wood processing: scientific works]. Moscow: MGUL, 2016, v. 381, pp. 85–88.
- [14] Meledina T.V., Davydenko S.G. *Drozhzhi Saccharomyces cerevisiae. Morfologiya, ximicheskij sostav, metabolizm* [Yeast *Saccharomyces cerevisiae*. Morphology, chemical composition, metabolism]. St. Petersburg: ITMO University, 2015, 88 p.
- [15] Tarnopolskaya V.V., Alaudinova E.V., Mironov P.V. *Perspektivy ispol'zovaniya bazi-dial'nykh gribov dlya polucheniya kormovykh produktov* [Prospects for using basidiomycetes to produce feed products]. Khvoynye boreal'noy zony [Conifers of the boreal zone], 2016, t. 37, no. 5–6, pp. 338–341.
- [16] Chen B., Perumal P., Illikainen M., Ye G. A review on the utilization of municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash as a mineral resource for construction materials. *J. of Building Engineering*, 2023, v. 71, pp. 106–138.
- [17] Rabinovich M.L., Bolobova A.V., Kondrashchenko V.I. *Teoreticheskie osnovy biotekhnologii drevesnykh kompozitov: v 2 kn. Kn. I. Drevesina i razrushayushchie ee griby* [Theoretical foundations of biotechnology of wood composites], in 2 books. Book I. Wood and fungi that destroy it. Moscow: Nauka, 2001, 264 p.
- [18] Semenkova I.G. *Fitopatologiya. Derevorazrushayushchie griby, gnili i patologicheskie okraski drevesiny (opredelitel'nye tablitsy)* [Plant pathology. Wood-destroying fungi, rot and pathological colors of wood (identification tables)]. Moscow: MGUL, 2008, 72 p.
- [19] Azarov V.I., Kononov G.N., Goryachev N.L. *Fitopatologiya. Derevorazrushayushchie griby, gnili i patologicheskie okraski drevesiny (opredelitel'nye tablitsy)* [Phytopathology. Wood-destroying fungi, rot and pathological colors of wood (identification tables)]. Tekhnologiya i oborudovanie dlya pererabotki drevesiny: nauchnye trudy [Technology and equipment for wood processing: scientific works]. Moscow: MGUL, 2012, v. 358, pp. 126–131.
- [20] Kononov G.N. *Dendrokhiimiya. Khimiya, nanokhiimiya i biogeokhiimiya komponentov kletok, tkaney i organov drevesnykh rasteniy* [Dendrochemistry. Chemistry, nanochemistry and biogeochemistry of components of cells, tissues and organs of woody plants]. V. I, II. Moscow: Moscow State Publishing House University of Forests, 2015, 1111 p.
- [21] Melnikova E.A., Tarchenkova T.M., Mironov P.V. *Ispol'zovanie glubinnoy biomassy mitseliya Pleurotus pulmonarius v kachestve posevnogo materiala dlya vyrashchivaniya plodovykh tel* [Use of deep biomass of *Pleurotus pulmonarius* mycelium as seed material for growing fruiting bodies]. Khvoynye boreal'noy zony [Conifers of the boreal zone], 2013, t. 31, no. 3–4, pp. 97–100.
- [22] Mamaeva O.O., Isaeva E.V., Loskutov S.R., Plyashechnik M.A. *Komponentnyy sostav produkta biodestruktsii opavshikh list'ev bazidial'nykh gribami Pleurotus pulmonarius (shtamm RR-3.2)* [Component composition of the product of biodestruction of fallen leaves by basidiomycetes *Pleurotus pulmonarius* (strain PP-3.2)]. Khimiya rastitel'nogo syr'ya [Chemistry of plant materials], 2021, no. 1, pp. 277–285.
- [23] 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: 10.18698/2542-1468-2022-2-69-84etin, 2019. T. 23. № 5. pp. 95–100. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-5-95-100
- [24] Verevkin A.N., Zueva N.N., Voyvodov K.I., Yakovleva V.I., Berezin I.V. *Kineticheskiy mekhanizm mnogosubstratnykh obratimnykh reaktsiy v heterogennykh biokataliticheskikh sistemakh* [Kinetic mechanism of multisubstrate reversible reactions in heterogeneous biocatalytic systems]. Biokhiimiya [Biochemistry], 1986, t. 51, no. 3, pp. 395–403.
- [25] Geles I.S. *Drevesnye resursy — strategicheskaya osnova i rezerv tsivilizatsii* [Wood resources are the strategic basis and reserve of civilization]. Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2007, 499 p.
- [26] Li A.-H., Yuan F.-X., Groenewald M., Bensch K., Yurkov A.M., Li K., Han P.-J., Guo L.-D., Aime M.C., Sampaio J.P., Jindamorakot S., Turchetti B., Inacio J., Fungsin B., Wang Q.-M. Diversity and phylogeny of basidiomycetous yeasts from plant leaves and soil: Proposal of two new orders, three new families, eight new genera and one hundred and seven new species. *Studies in Mycology*, 2020, v. 96, pp. 17–140.
- [27] Markova M.E., Uryash V.F., Stepanova E.A., Gruzdeva A.E., Grishatova N.V., Demarin V.T., Tumanova A.N. *Sorbtsiya tyazhelykh metallov vysshimi gribami i khiminom raznogo proiskhozhdeniya v opytakh invitro* [Sorptions of heavy

- metals by higher fungi and chymines of various origins in invitro experiments]. Vestnik NNGU [Bulletin of Nizhny Novgorod State University]. Seriya Biologiya [Biology Series]. Nizhny Novgorod: NNGU, 2008, no. 6, pp. 1118–124.
- [28] Zhenju B., Xinqi G., Jing Z., Yafang L., Li Y. Antifungal activity of heat-treated wood extract against wood decay fungi. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2024, v. 193, pp. 1043–1058.
- [29] Wenjing Z., Zhiyang D., Tianyi L., Jianfen L., Jun L. Fermentation with edible mushroom mycelia improves flavor characteristics and techno-functionalities of soybean protein. *Food Bioscience*, 2024, v. 59, pp. 1023–1041.
- [30] Hakan B., Hilal Y., Hale Ö., Candan T., Hyunchoe J., Kaichang L., Kimberly M., Hanshu D., Feng X. Purification and characterization of manganese peroxidase from wood-degrading fungus *Trichophyton rubrum* LSK-27. *Enzyme and Microbial Technology*, 2004, v. 34, pp. 87–92.
- [31] Embacher J., Zeilinger S., Kirchmair M., Luis M., Rodriguez-R., Neuhauser S. Wood decay fungi and their bacterial interaction partners in the built environment — A systematic review on fungal bacteria interactions in dead wood and timber. *Fungal Biology Reviews*, 2023, v. 45, pp. 100–113.
- [32] Du H., Ayouz M., Lv P., Perré P. A lattice-based system for modeling fungal mycelial growth in complex environments. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2018, v. 511, pp. 191–206.
- [33] Azarov V.I., Vinoslavsky V.A., Kononov G.N. *Laboratornyy praktikum po khimii drevesiny i sinteticheskikh polimerov* [Laboratory workshop on the chemistry of wood and synthetic polymers]. Moscow: MGUL, 2006, 248 p.
- [34] Jensen V., Ilvessalo-Pryaffli M. S., Norin T., etc. *Khimiya drevesiny* [Chemistry of wood]. Moscow: Lesn. prom-st, 1982, 399 p.
- [35] Kononov G.N. *Khimiya drevesiny i ee osnovnykh komponentov* [Chemistry of wood and its main components]. Moscow: MSFU, 1999, 247 p.
- [36] Alekseev V.N. *Kurs kachestvennogo khimicheskogo polumikroanaliza* [Course of qualitative chemical semi-microanalysis]. Moscow: Khimiya (Chemistry), 1973, 584 p.
- [37] Reshetnikova I.A., Gazaryan I.G., Verevkin A.N., Fechina V.A., Miroshnichenko T.G., Egorov A.M. *Poisk gribov-produtsentov peroksidazy* [Search for peroxidase-producing fungi]. *Mikrobiologiya i fitopatologiya* [Microbiology and phytopathology], 1992, t. 26, no. 5, pp. 383–387.
- [38] Vitiello L., Salzano de Luna M., Ambrogi V., Filippone G. A simple rheological method for the experimental assessment of the fiber percolation threshold in short fiber biocomposites. *Composites Science and Technology*, 2024, v. 245, pp. 1103–1110.
- [39] Wojno S., Ahlinder A., Altskär A., Stading M., Abitbol T., Kádár R. Percolation and phase behavior in cellulose nanocrystal suspensions from nonlinear rheological analysis. *Carbohydrate Polymers*, 2023, v. 15, pp. 1206–1211.
- [40] Radhika N., Sachdeva S., Kumar M. Lignin depolymerization and biotransformation to industrially important chemicals/biofuels. *Fuel*, 2022, v. 312, pp. 1215–1229.
- [41] Wang Y., Zhang Zh., Fan H., Wang J. Wood carbonization as a protective treatment on resistance to wood destroying fungi. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2018, v. 129, pp. 42–49.
- [42] Mishra V. Jana A., Jana M., Gupta A. Enhancement in multiple lignolytic enzymes production for optimized lignin degradation and selectivity in fungal pretreatment of sweet sorghum bagasse. *Bioresource Technology*, 2017, v. 236, pp. 49–59.

Authors' information

Verevkin Aleksey Nikolayevich✉ — Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), verevkin@bmstu.ru

Kononov Georgy Nikolaevich — Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, academician, Secretary of the Section «Chemistry and Chemical Technology of Wood» of the D.I. Mendeleev Russian Chemical Society, kononov@bmstu.ru

Received 16.02.2024.

Approved after review 20.09.2024.

Accepted for publication 05.02.2025.

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

ПОЛУЧЕНИЕ МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ИЗ ОДНОЛЕТНИХ РАСТЕНИЙ С ПРЕДГИДРОЛИЗНЫМ РАЗМОЛОМ ВОЛОКНИСТОЙ МАССЫ

Л.В. Юртаева

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

2052727@mail.ru

Описана возможность получения микрокристаллической целлюлозы из альтернативных дорогой деловой древесине источников сырья — однолетних растений. Проведены сульфатные варки образцов пшеничной соломы (*Triticum sp.*) и костры технической конопли сорта Сурская в лабораторном автоклаве с последующим размолотом волокнистой суспензии в полупромышленной дисковой мельнице от 15...85 градусов Шоппер — Риглера (°ШР), химической обработкой образцов целлюлозы (условия гидролиза в зависимости от степени помола: температура $t = 80...100$ °С, концентрация соляной кислоты 54,75...91,25 г/л, время 60...120 мин). Получены количественные данные о бумагообразующих свойствах волокнистой массы — длине волокна, водоудерживающей способности, фракционном составе с различным содержанием лигнина и разной степенью помола. Выявлено, что количественные значения разрывной длины при степени помола 85 °ШР у образцов из пшеничной соломы в 1,3 раза больше, чем у образцов из костры технической конопли, сопротивление раздиранию в 1,2 раза, сопротивление продавливанию отличается незначительно, всего на 10 %. Проанализирован характер изменения степени полимеризации и насыпной плотности образцов конечного продукта после химической обработки. Определены наиболее эффективные условия ее проведения. Рассмотрена возможность регулирования качественных показателей микрокристаллической целлюлозы в зависимости от ее назначения. Установлено, что предварительный размол в водной среде, уменьшает «жесткость» процесса гидролиза и позволяет снизить степень полимеризации у образцов микрокристаллической целлюлозы из костры технической конопли на 78 %, пшеничной соломы — на 56 %. Результаты исследования могут служить основой для создания экономически выгодного технологического процесса при получении микрокристаллической целлюлозы.

Ключевые слова: размол, микрокристаллическая целлюлоза, гидролиз, фибрилляция, однолетние растения

Ссылка для цитирования: Юртаева Л.В. Получение микрокристаллической целлюлозы из однолетних растений с предгидролизным размолотом волокнистой массы // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 2. С. 120–134. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-2-120-134

Целлюлозно-бумажная промышленность — одна из крупнейших и значимых отраслей экономики, которая перерабатывает древесину, производит целлюлозу, бумажно-картонные изделия и некоторые побочные продукты — талловое масло, лигносульфонат и фурфурол. Ее продукция является незаменимой и востребованной в различных отраслях экономики. Однако для сохранения конкурентоспособности на рынке и удовлетворения постоянно растущего спроса на продукцию целлюлозно-бумажной промышленности необходимо ее регулярно развивать, внедряя новейшие технологии [1].

Перспективной в этом направлении признана глубокая переработка древесины, позволяющая получать широкий ассортимент таких продук-

тов, как биотопливо, строительные материалы, мебель и многих других, способствуя увеличению добавленной стоимости и повышению эффективности использования лесных ресурсов. К одному из продуктов глубокой переработки древесины относится микрокристаллическая целлюлоза (МКЦ) — природный полимер, получаемый из древесины и других лигноцеллюлозных материалов, который имеет высокую степень чистоты, мелкодисперсен, что делает его идеальным материалом для многих сфер применения [2–7].

Основными отраслями, использующими МКЦ при добавлении в готовую продукцию, являются пищевая промышленность (в качестве загустителя, стабилизатора и агента, улучшающего структуру продуктов), фармакологическая (для создания лекарственных форм и повышения стабильности препаратов), косметическая

(как добавка в кремы, гели, лосьоны и другие продукты для улучшения текстуры, вязкости и стабильности), строительная (в виде пластирующих и тиксотропных добавок для сухих строительных смесей, бетонов и цементных растворов), а так же химическая промышленность (в качестве добавки, предотвращающей комкование и слеживание сыпучих материалов и реактивов, стабилизатора и эмульгатора в производстве красок и эмульсий на водной основе). Широкая область применения МКЦ объясняется тем, что она обладает высокой степенью биоразлагаемости, не токсична, безвредна и не взаимодействует с ингредиентами изделий, в которые ее добавляют [8, 9]. Несмотря на увеличивающийся спрос промышленного производства МКЦ, многие способы ее получения остаются не эффективными, но признаны экологичными и экономически целесообразными [10–14].

Поскольку основными источниками сырья для производства МКЦ служат преимущественно дорогие волокна — древесное и хлопковое, одним из способов решения данной проблемы может быть замена дорогих на более дешевые альтернативные источники сырья — сельскохозяйственные отходы производства: солому, костру технической конопли. К преимуществам использования данных видов сырья относят следующие:

- быстрая возобновляемость, что особенно важно для безлесных районов;
- низкие экономические затраты;
- утилизация сельскохозяйственных отходов (однолетних растений).

Ежегодно в России производится от 16 до 24 т соломы, из которой только 0,2 % используется в виде сырья в промышленности [15, 16].

Рассмотрим анатомическое строение стеблей однолетних растений (рис. 1, табл. 1) [17–19].

Анализ анатомического строения стеблей показал, что строение соломы и конопли отличается. Пшеничные стебли обладают меньшей прочностью и стержневой устойчивостью, но имеют более грубые (за счет большей ширины) отдельные ячейки в отличие от конопли. При этом в составе клеточных стенок лигноцеллюлозных материалов, в зависимости от вида растительного полимера, содержится разное количество целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина. Натуральная целлюлоза представляет собой полукристаллический полимер, состоящий из кристаллической и аморфной областей в форме волокон, связанных между собой гемицеллюлозой и защищенных лигнином, что затрудняет ее химическую переработку. В зависимости от сорта и мест произрастания лигноцеллюлозные

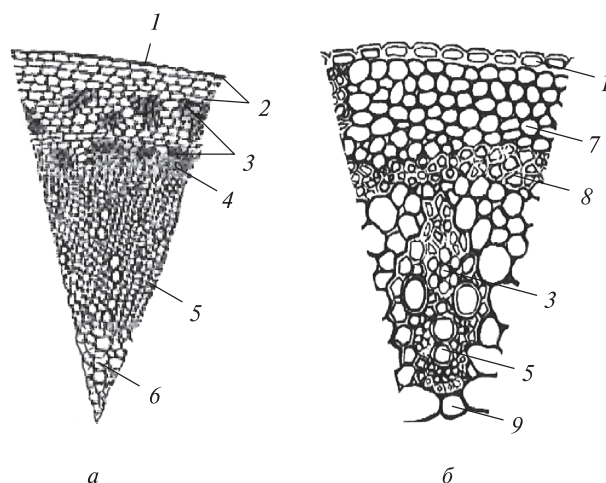


Рис. 1. Фрагменты строения стеблей однолетних растений: *a* — солома; *б* — техническая конопля; 1 — эпидерма; 2 — первичная кора; 3 — флоэма; 4 — камбий; 5 — ксилема; 6 — сердцевина; 7 — хлоренхима; 8 — склеренхима; 9 — основная паренхима

Fig. 1. Fragments of the structure of stems of one-year old plants: *a* — straw; *b* — technical hemp; 1 — epidermis; 2 — primary bark; 3 — phloem; 4 — cambium; 5 — xylem; 6 — core; 7 — chlorenchyme; 8 — sclerenchyme; 9 — basic parenchyma

материалы содержат около 32...47 % целлюлозы, 19...27 % гемицеллюлозы и 5...24 % лигнина. Для получения высококачественной МКЦ важно удалить максимальное количество лигнина и гемицеллюлозы из клеток растительных полимеров, поскольку они снижают адсорбционную способность растительных волокон [20–23].

Анализ различных направлений получения микрокристаллической целлюлозы из однолетних растений и сельскохозяйственных отходов показал следующее.

Выбор способа ее производства зависит от вида исходного сырья. Так, например, использование технической конопли в реальном производстве может быть затруднено вследствие необходимости жесткого контроля содержания канбиоидов. К тому же многие растительные материалы, обладая пористой структурой, замедляют теплообмен процесс во время химической обработки. В результате затрудняется проникновение кислоты в растительные клетки с последующим равномерным нагревом всего гидролизующего материала, и, так как МКЦ имеет низкое соотношение аморфной и кристаллической областей, это приводит к низким выходам и плохим свойствам продукта.

В настоящее время не существует технологии, обеспечивающей промышленный способ производства МКЦ с точки экологичности и управляемости процесса [22, 24–28].

Анатомическое строение стеблей однолетних растений
Anatomical structure of annual plants stems

Часть стебля	Солома пшеницы	Конопля
Внешняя первичная покровная ткань	Однослойный эпидермис, стенки клеток которого утолщены, но обычно не содержат лигнина	Эпидерма с многочисленными железистыми волосками
Первичная кора	Слабо выражена	Хорошо развита и дифференцирована (колленхима, хлорофиллоносная паренхима, крахмалоносная эндодерма)
Сердцевина	Отсутствует	Со временем разрушается, в результате чего образуется полость
Флоэма	Наличие во флоэме только проводящих элементов — ситовидных трубок с клетками-спутницами	Состоит из паренхимы, лубяных волокон и проводящих элементов
Первичное строение	Сохранение в течение всей жизни	Рано сменяется вторичным
Пучки	Коллатеральные, закрытого типа (без камбия)	Проводящие, открытого типа (имеют камбий)
Расположение сосудисто-волокнистых пучков	Разбросанное	Кольцевое или сливаются (непучковое строение)
Клетчатка	Содержится в сложной структуре эндосперма	Содержится в волокнах луба
Центральная часть стебля (цилиндр)	Крупноклеточная паренхима, которую пронизывают проводящие пучки, окруженные склеренхимным кольцом	Флоэма, за которой располагается камбий, ксилема и сердцевина

В связи с этим в Сибирском государственном университете имени академика М.Ф. Решетнева, в лаборатории кафедры машин и аппаратов промышленных технологий ведутся исследования в области получения МКЦ из различных видов сырья с предварительным размолотом волокнистых полуфабрикатов в водной среде как ножевым, так и безножевым способами размолот перед химической обработкой [29, 30]. На наш взгляд, способность размалывающего оборудования разделять различные растительные полимеры на волокна, измельчать их и развивать у них определенные свойства можно использовать не только в целях получения длинноволокнистых фракций, но и таких мелкодисперсных, как МКЦ. Предполагается, что размол волокнистой массы в присутствии воды перед гидролизом будет способствовать снижению расходов на проведение химической обработки целлюлозы и энергоёмкости процесса получения МКЦ вследствие разрушения внешней поверхности оболочки волокон и увеличения их активной поверхности.

Цель работы

Цель работы — исследование влияния предгидролизного размолот волокнистой массы в водной среде на процесс получения микрокристаллической целлюлозы из однолетних растений.

Материалы и методы

В задачи исследования входили следующие процессы:

- получение целлюлозы из однолетних растений;
- размол волокнистой суспензии с использованием полупромышленной дисковой мельницы (предгидролизный размол) [31, 32];
- сравнение бумагообразующих свойств волокнистой массы и физико-механических характеристик образцов бумаги до и после размолот;
- химическая обработка целлюлозы после размолот;
- сравнение степени полимеризации макромолекул целлюлозы из однолетних растений при разной степени помола по шкале Шоппер — Риглера.

В качестве сырья выступали целлюлоза, полученная из пшеничной соломы (*Triticum sp.*), и костры технической конопли сорта Сурская.

Контроль процесса варки, размолот волокнистой массы и качества образцов микрокристаллической целлюлозы, полученной из однолетних растений, осуществляли с помощью следующих лабораторных методов:

- определения массовой доли лигнина в целлюлозе (ГОСТ 11960) [33];
- массовой доли альфа-целлюлозы (ГОСТ 6840–78) [34];

– измерения степени помола по °ШП (ISO 5267–1–1999) [35];

– средней длины волокна (прибор СДВ-Т, Россия);

– измерения фракционного состава (аппарат ФДМ) [36].

При фракционировании использовали сита с параметрами: сито № 1 — 30 нитей на дюйм (отверстие 0,595 мм), сито № 2 — 50 нитей на дюйм (0,297 мм), сито № 3 — 100 нитей на дюйм (0,149 мм);

– получения отливок (ISO 5269–1–2005) [37];

– определения физико-механических характеристик готовых отливок, среди которых разрывная длина, сопротивление продавливанию, сопротивление раздиранию (ISO 5270–2012), (ISO 1924–2–2008), (ISO–1974–2012) [38–40];

– определения степени полимеризации (ГОСТ 25438–82) [41].

В качестве катализатора гидролиза использовали соляную кислоту квалификации «х. ч.» (ГОСТ 3118–77). Растворы готовили с использованием дистиллированной воды (ГОСТ 6709–72).

Высушенные на воздухе стебли пшеницы и костры технической конопли, заготовленные по окончании вегетационного периода, измельчали в лабораторной мельнице марки VLM-2 (Россия) на отрезки длиной до 7 мм.

Получение целлюлозы из пшеничной соломы и костры технической конопли осуществлялось варочным раствором, основными компонентами которого служили гидроксид и сульфид натрия (NaOH и Na₂S). Варка проводилась в лабораторном автоклаве при максимальной температуре 160 °С в течение 3 ч, жидкостном модуле — 4,5, степени сульфидности варочного раствора — 18 %. Промывку и сортирование целлюлозы проводили в лабораторной сееже.

Выход целлюлозных продуктов определяли гравиметрическим методом и рассчитывали по уравнению

$$Y = \frac{m}{m_0},$$

где Y — выход целлюлозного продукта, % (мас.);

m — масса абсолютно сухого целлюлозного продукта, г;

m_0 — масса абсолютно сухой древесины, г.

Гидроразмол волокнистой массы с одновременной отбелкой гипохлоритом натрия (NaOCl) при гидромодуле 1:18 проводился в полупромышленной дисковой мельнице после роспуска в гидроразбивателе при концентрации 10 кг/м³. Пробы отбирались каждые 5 мин до степени помола 85 °ШП.

Конструктивные и технологические характеристики ножевой традиционной восьмисекторной гарнитуры с прямолинейной формой ножей и углом 22,5°:

Наружный/внутренний

диаметр, мм 300/120

Толщина/высота ножей/ширина

канавки, мм 4/4/4

Секундная режущая длина, м/с 23074

Площадь контакта ножей ротора

и статора, м² 0,0198

Отношение площади поверхности

ножей к общей площади поверхности

гарнитуры, % 45

Частота вращения ротора, об./мин 2000

Межножевой зазор, мм 0,1.

Это наиболее эффективные характеристики с точки зрения продолжительности размола и степени разработки волокна, а также на основании ранее проведенных исследований [29, 31, 42, 43].

После размола выполняли последовательно описанные ниже процедуры.

Определяли содержание лигнина, альфа-целлюлозы, среднеарифметическую длину волокна, водоудерживающую способность, фракционный состав.

Проводили механические испытания лабораторных образцов массой 75 г/м², изготовленных на листоотливном аппарате «PL6-C». Перед определением механических характеристик отливки подвергали кондиционированию при температуре 23 ± 1 °С и относительной влажности воздуха 50 ± 2 %. Каждая характеристика составляет среднее арифметическое пяти измерений с относительной погрешностью 2,5 ± 2 %. Разрывную длину замеряли с помощью машины РМБ-30-2М, сопротивление продавливанию — на приборе фирмы ГМІ – ПГБ, сопротивление раздиранию — на приборе Р-1.

Образцы целлюлозы сухостью 93...98 % подвергали кислотному гидролизу (химической обработке). Навеску целлюлозы массой 10 г обрабатывали в трехгорлой круглодонной колбе из термостойкого стекла вместимостью 500 мл, снабженную мешалкой, обратным холодильником и термометром, различными концентрациями раствора HCl (соотношение твердого и жидкого компонентов 1:15) при постоянном перемешивании со скоростью 120 об./мин. Колбу нагревали до различных значений температуры. Из реакционной смеси отбирали пробы при различных параметрах реакции в соответствии с планом эксперимента, который состоял для каждого вида сырья из матрицы на 81 режим проведения процесса гидролиза (табл. 2). Каждый образец из гидролизного

Уровни и интервалы варьирования исследуемых факторов

Levels and intervals of the studied factors variety

Фактор	Обозначение		Интервал варьирования фактора	Уровень варьирования фактора		
	натуральное	нормализованное		-1	0	+1
Концентрация кислоты, г/л	c	X_1	18,25	54,75	73	91,25
Температура, °С	t	X_2	10	80	90	100
Длительность гидролиза, мин	τ	X_3	30	60	90	120
Степень помола, °ШР	°ШР	X_4	35	15	50	85

раствора промывали дистиллированной водой, пока фильтрат не достигал нейтрального значения рН. Затем образец центрифугировали для удаления воды и высушивали на воздухе.

Интервалы варьирования в зависимости от степени помола: температура $t = 80 \dots 100$ °С, концентрация соляной кислоты 54,75...91,25 г/л, время 60...120 мин.

Для математической обработки результатов использовали пакет программ Statistica (планирование экспериментов, регрессионный и дисперсионный анализы).

Для определения степени полимеризации целлюлозы после гидролиза определялась вязкость раствора комплексным соединением гексанатрия тристарта железа. Степень полимеризации рассчитывали по формуле

$$СП = \frac{[\eta]}{K_m},$$

где $[\eta]$ — характеристическая вязкость;

K_m — вязко-молекулярная константа, равная для растворов железо-винно-натриевого комплекса 0,33.

Для записи дифрактограмм использовали рентгеновский дифрактометр ДРОН-3, излучение Сука, сканирование 1 град/мин, шаг сканирования 0,02 град. Расчет индекса кристалличности (IC) проводился по методу Сегала [44].

Гидролизованную целлюлозу подвергали диспергированию на шаровой мельнице до мелкодисперсного состояния. Размеры частиц полученных образцов МКЦ замеры на сканирующем микроскопе высокого разрешения Hitachi SU3500 (ускоряющее напряжение — 0,3...30 кВ, детектор — вторичных и обратно рассеянных электронов).

Насыпную плотность (Y , г/см³) вычисляли по формуле

$$Y = \frac{g_1 - g}{V},$$

где g — масса мерного цилиндра, г;

g_1 — масса мерного цилиндра с гидролизованной целлюлозой, г;

V — объем мерного цилиндра, занимаемый гидролизованной целлюлозой, см³.

Результаты и обсуждение

После сульфатной варки выход целлюлозы из пшеничной соломы составил 42 %, из костры технической конопли — 38 %.

Вид сырья, размеры, свойства и химический состав исходных волокнистых материалов оказывают существенное влияние на свойства волокнистой суспензии (флокуляцию, реологические свойства и др.) [45, 46], поэтому эти характеристики следует учитывать как при составлении композиции волокнистой массы, так и при организации всего технологического процесса получения МКЦ.

Поскольку преимущественное укорочение волокон является необходимым условием для получения МКЦ, размол в водной среде в полупромышленной дисковой мельнице проводился при низкой концентрации волокнистой массы. При такой концентрации воздействие ножей размалывающей гарнитуры происходит равномерно по всему объему волокнистой суспензии. Использование ножевой традиционной восьмисекторной гарнитуры с прямолинейной формой ножей и углом 22,5° позволяет получить оптимальные соотношения как рубящего, так и фибриллирующего эффектов (развитие внутренней и внешней фибрилляции) [31].

Увеличение внешней фибрилляции связано в полном или частичном отделении от волокна фибрилл (образование мелких частиц) и ослабление его прочности.

Увеличение внутренней фибрилляции является результатом разрыва водородных связей между структурными элементами целлюлозных волокон (микро- и макроволокон) и

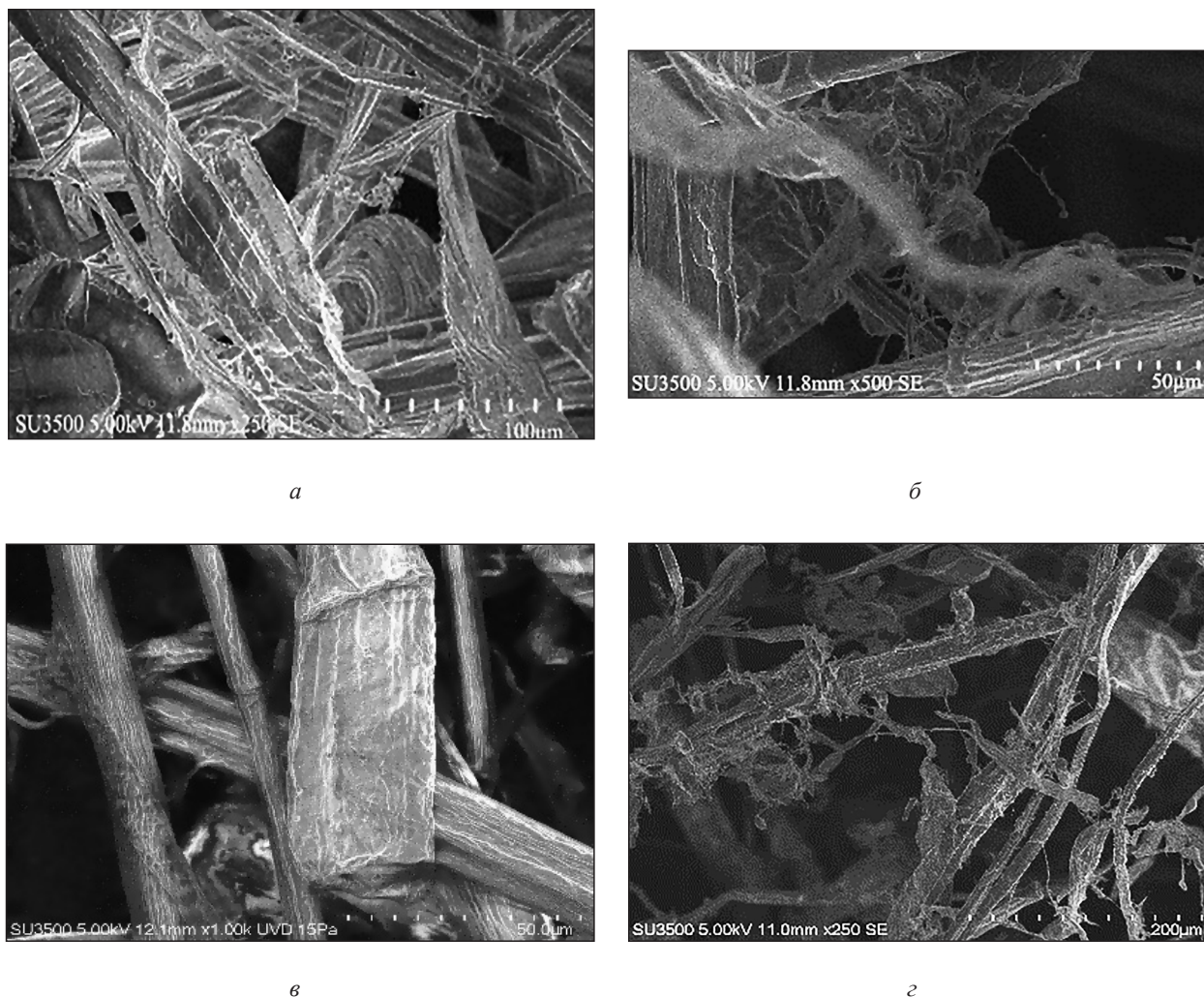


Рис. 2. Структура образцов волокон целлюлозы на снимках электронного микроскопа SEM Hitachi SU3500, иллюстрирующей эффективность разработки волокнистой суспензии во время размола: *степень помола волокнистой массы °ШР*: а — костры, 15; б — костры, 85; в — соломы, 15; г — соломы, 85

Fig. 2. The structure of cellulose fiber samples on SEM Hitachi SU3500 electron microscope images illustrating the efficiency of fiber slurry development during milling: *the degree of grinding of the fibrous mass, °SR*: а — hemp refuse, 15; б — hemp refuse, 85; в — hemp refuse, 15; г — hemp refuse, 85

молекулами воды, что приводит к увеличению способности волокон к набуханию и, как следствие, в дальнейшем к лучшему проникновению кислоты во время химической обработки.

В целях контроля процесса размола и определения скорости отдачи воды волокнистой суспензией, проводился забор массы на определение степени помола, измеряемой в условных градусах Шоппер — Риглера, при значениях 15...85 °ШР (табл. 3).

Как видно из табл. 3, с увеличением степени помола количество лигнина и средняя длина снижаются, водоудерживающая способность и содержание мелкой фракции увеличиваются. Унос волокон целлюлозы из пшеничной соломы составляет в 1,9 раза больше, чем волокон

целлюлозы из костры технической конопли, поскольку тонкие и длинные волокна пшеничной соломы более подвержены внешней фибрилляции (рис. 2).

По результатам микроскопического исследования сделаны следующие выводы:

- образцы до размола имеют относительно ровную и гладкую поверхность, что указывает на ее жесткую и высокоупорядоченную структуру их поверхности;

- вследствие размола волокна модифицируются, расщепляются в продольном направлении с образованием лент из волосообразных нитей.

При этом с ростом степени помола происходит развитие внешней удельной поверхности

Т а б л и ц а 3

Экспериментальные данные предгидролизного размола волокнистой массы
Experimental data of prehydrolysis slush refining

Вид сырья	Лигнин, %	Альфа-целлюлоза, %	Средняя длина волокна, мм	Водоудерживающая способность, %	Состав по фракциям, %		
					грубая	средняя	мелкая
До размола (15 °ШР)							
Костра	2,17	89,4	2,34	216	2,37	2,07	0,43
Солома	1,61	87,5	2,85	260	2,73	0,71	0,30
После размола в воде (85 °ШР)							
Костра	1,18	89,4	1,43	468	1,27	1,37	0,87
Солома	0,91	87,5	1,89	519	1,55	0,84	0,54

Т а б л и ц а 4

Зависимость физико-механических характеристик от степени помола
Dependence of physical and mechanical characteristics on the refining degree

Вид сырья	15 °ШР	35 °ШР	60 °ШР	85 °ШР	НС-2 (60)	НС-3 (60)
Разрывная длина, км						
Костра	3,2	6,6	8,0	7,4	8,2	7,8
Солома	5,1	7,2	10,2	9,2		
Сопротивление раздиранию, мН						
Костра	161	475	636	598	760	630
Солома	157	510	745	696		
Сопротивление продавливанию, кПа						
Костра	105	173	325	340	–	–
Солома	165	280	380	350		

Примечание. НС-2, НС-3 — показатели согласно ГОСТ 11208–82 при степени помола 60 °ШР.

волокон (см. рис. 2, б, г), снижается скорость водоотдачи, повышаются адсорбция, водоудерживающая способность и количественные значения механических показателей.

После размола волокнистой массы (табл. 4) в водной среде до 60 °ШР, количественные значения механических показателей изменились следующим образом: разрывная длина у образцов из костры технической конопли увеличилась в 2,5 раза, у образцов из пшеничной соломы в 2 раза; сопротивление раздиранию, соответственно, в 3,9 и 4,4 раза; сопротивление продавливанию в 3,2 и 2,2 раза. Это свидетельствует о том, что расслоение стенки (внутренняя фибрилляция) было интенсивнее во время размола у волокон костры технической конопли.

Механические свойства отливок при степени помола 60 °ШР, соответствуют следующим показателям (ГОСТ 11208–82):

– из целлюлозы костры технической конопли для изготовления влагопрочной бумаги, бумаги — основы для внутренних слоев декоративно слоистого пластика, картона для торцовых крышек фильтрующих элементов;

– пшеничной соломы для изготовления мешочной бумаги, светонепроницаемой бумаги, бумаги для текстильных патронов и конусов, основы для клеевой ленты, для гладких слоев картона, картона коробочного, водостойкого, обивочного, прокладочного, обувного и других видов бумаги и картона.

Для удаления аморфной части, имеющей значение связки между фибриллами, и получения микрокристаллической целлюлозы образцы целлюлозы (костры технической конопли и пшеничной соломы) со степенью помола 15 °ШР, 50 °ШР, 85 °ШР подвергали химической обработке до предельной степени полимеризации.

Для определения приемлемых условий проведения процесса гидролитической деструкции целлюлозы в ходе эксперимента использовали четыре фактора: X_1 — концентрация кислоты; X_2 — температура; X_3 — продолжительность гидролиза; X_4 — степень помола (см. табл. 2). Результаты серии опытов характеризовали выходным параметром Y_1 (степень полимеризации). Четырехфакторный план эксперимента по каждому виду сырья составил 81 режим проведения процесса гидролиза.

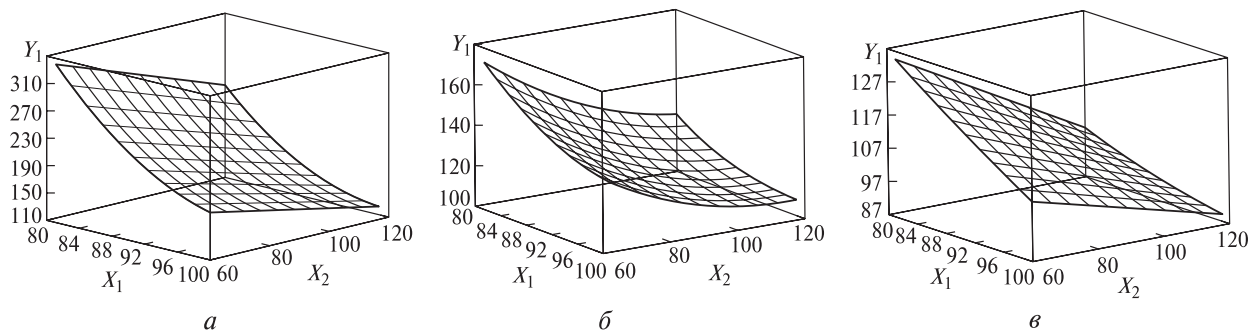


Рис. 3. Зависимость степени полимеризации от температуры и продолжительности гидролиза (концентрация кислоты 54,75 г/л): степень помола волокнистой массы костры, °ШР: а — 15; б — 50; в — 85

Fig. 3. Dependence of the degree of polymerization on the temperature and duration of hydrolysis (acid concentration 54,75 g/l): the degree of grinding of the fibrous mass of bonfires, °SR: а — 15; б — 50; в — 85

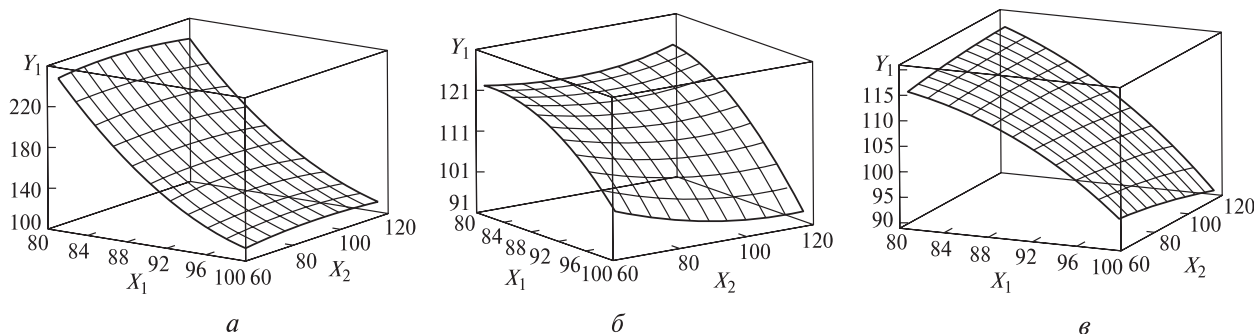


Рис. 4. Зависимость степени полимеризации от температуры и продолжительности гидролиза (концентрация кислоты 73 г/л): степень помола волокнистой массы костры, °ШР: а — 15; б — 50; в — 85

Fig. 4. Dependence of the degree of polymerization on the temperature and duration of hydrolysis (acid concentration 73 g/l): the degree of grinding of the fibrous mass of bonfires, °SR: а — 15; б — 50; в — 85

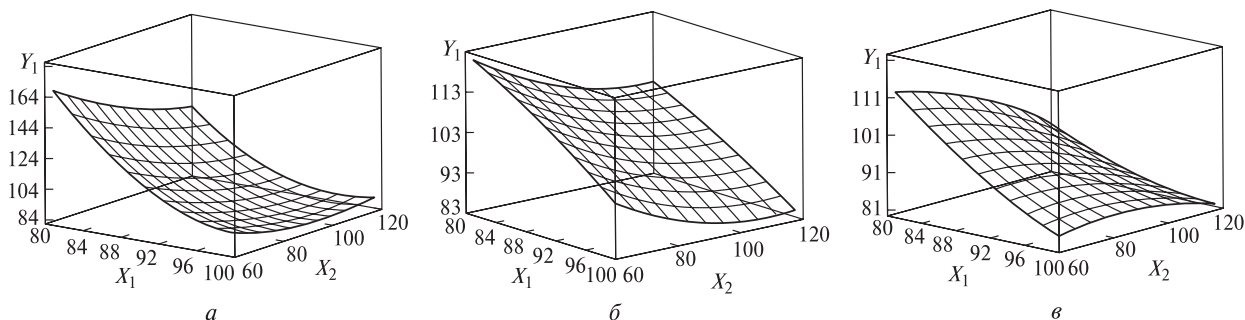


Рис. 5. Зависимость степени полимеризации от температуры и продолжительности гидролиза (концентрация кислоты 91,25 г/л): степень помола волокнистой массы костры, °ШР: а — 15; б — 50; в — 85

Fig. 5. Dependence of the degree of polymerization on the temperature and duration of hydrolysis (acid concentration 91,25 g/l): the degree of grinding of the fibrous mass of bonfires, °SR: а — 15; б — 50; в — 85

Характеристики образцов микрокристаллической целлюлозы
Characteristics of microcrystalline cellulose samples

Сырье	Выход, %	Насыпная плотность, г/мл	Степень кристаллическости	Степень полимеризации	Условия проведения гидролиза
До размола (15 °ШР)					
Костра	97,0	0,244	0,70	292	Концентрация HCl 91,25 г/л, температура 100 °С, время 60 мин
Солома	97,0	0,182	0,69	310	Концентрация HCl 91,25 г/л, температура 100 °С, время 60 мин
После размола в воде (85 °ШР)					
Костра	96,0	0,316	0,80	55	Концентрация HCl 54,75 г/л, температура 90 °С, время 60 мин
Солома	96,0	0,239	0,77	95	Концентрация HCl 54,75 г/л, температура 90 °С, время 60 мин
Хлопок, Avicel стандарт FAO UN MCC 460 i	–	0,280...0,360	0,63...0,82	265	Концентрация HCl 91,25 г/л, температура 100 °С, время 30 мин

Эксперименты показали, что независимо от степени помола целлюлозы и концентрации соляной кислоты наименьшие значения степени полимеризации определены при температуре гидролиза 100 °С, в течение 120 мин (рис. 3, в, рис. 4, в, рис. 5, в). Выход готового продукта — 88,0 ± 2 %. Условия процесса, при которых были достигнуты наибольшие значения степени полимеризации, соответственно: 80 °С/60 мин; выход продукта 96,0 %. Наблюдаемое снижение степени полимеризации подтверждает предположение исследователей [47–49], что кислота проникает внутрь волокна интенсивнее с повышением температуры и при большей продолжительности процесса. Отсюда следует, что межмолекулярные водородные связи и внутримолекулярные гликозидные связи целлюлозы в таких условиях легче разрушаются, что приводит к ее набуханию одновременно с химической деградацией. Набухание целлюлозы увеличивает площадь контакта между кислотой и целлюлозой и, следовательно, повышает эффективность гидролиза.

При подборе оптимальных условий гидролиза целлюлозы, полученной из костры технической конопли и пшеничной соломы, задача оптимизации сводилась к определению значений технологических параметров, обеспечивающих получение микрокристаллической целлюлозы с наименьшими затратами при условии разумного компромисса по выходным параметрам: выход продукта ≥ 93 %; степень полимеризации ≤ 350; белизна ≥ 85 %. Задача оптимизации: в пределах изученной области факторного пространства $54,75 \leq X_1 \leq 91,25$; $80 \leq X_2 \leq 100$;

$60 \leq X_3 \leq 120$; $15 \leq X_4 \leq 85$ вычислить, какой из факторов оказывает наибольшее влияние на количественное значение параметра Y_1 .

Линейное уравнение регрессии (на примере МКЦ из костры технической конопли) для определения влияния входных факторов (X_1 , г/л; X_2 , °С; X_3 , мин; X_4 , °ШР) на степень полимеризации принимает вид

$$Y_1 = 1321,29 - 6,336X_1 - 7,941X_2 - 5,643X_3 - 8,305X_4 - 0,011X_1^2 + 0,04X_1X_2 + 0,015X_1X_3 + 0,033X_1X_4 + 0,012X_2^2 + 0,011X_2X_3 + 0,016X_2X_4 + 0,008X_3^2 + 0,022X_3X_4 + 0,016X_4^2.$$

Представим поверхности откликов показателя степени полимеризации как функции от температуры и продолжительности гидролиза при разной степени помола (см. рис. 3–5).

Уравнение регрессии с достаточной степенью точности аппроксимирует искомые зависимости. Величина коэффициента детерминации для уравнений в среднем составляет $0,97 \pm 3$ (уровень значимости $p < 0,05$), что указывает на достоверность коэффициентов полученного уравнения. Из уравнения следует, что при гидролизе целлюлозы наибольшее влияние на величину степени полимеризации оказывает степень помола волокнистой массы, наименьшее — время химической обработки.

Выполнен сравнительный анализ условий проведения химической обработки однолетних растений и характеристик полученных образцов МКЦ из костры технической конопли и пшеничной соломы и Avicel стандарта FAO UN MCC 460 i (табл. 5).

Установлено (см. табл. 5), что выходные показатели полученных образцов соответствуют показателям для МКЦ Avicel стандарт FAO UN MCC 460 i. Гидролиз целлюлозы, прошедшей предварительный размол в водной среде, значительно уменьшил «жесткость» процесса и позволил получить МКЦ с более низкими значениями степени полимеризации. С ростом степени помола степень полимеризации снижается у образцов микрокристаллической целлюлозы из костры технической конопли на 78 %, пшеничной соломы — на 56 %.

Параметры гидролиза, такие как температура, время и концентрация кислоты, оказывают существенное влияние на степень кристалличности целлюлозы, что определяет упорядоченность ее полимерных цепей [8, 50]. Более того, на этапе гидролиза можно заранее предсказать значение этого параметра.

В данном исследовании показано, что в зависимости от условий гидролиза (вида сырья и степени помола) значение показателя степени кристалличности увеличилось на 9 ± 1 %.

Различное протекание кислотного гидролиза целлюлозы объясняется следующими причинами:

– анатомическими особенностями волокон — меньшей пористостью и высокой способностью поглощать кислоту;

– процессом размола, в результате которого разрушение межмолекулярных связей внутри клеточной стенки и увеличение внутренней фибриляции волокон происходят интенсивнее у волокон костры технической конопли, что в дальнейшем способствует лучшему проникновению кислоты внутрь волокна и удалению его аморфной части.

В дальнейших исследованиях предстоит вывести уравнение регрессии для определения влияния входных факторов (X_1 , г/л; X_2 , °С; X_3 , мин; X_4 , °ШР) на степень кристалличности.

Выводы

1. Растительные полимеры однолетних растений (костры технической конопли и соломы) являются полноценным сырьем для получения МКЦ.

2. Для достижения требуемых характеристик МКЦ, важно учитывать вид лигноцеллюлозного материала.

3. Размол волокнистой массы в водной среде перед процессом гидролиза повышает ее реакционную способность на 40 %.

4. В результате механохимической деструкции наименьшее значение степени полимеризации и среднего размера частиц достигнуто у МКЦ из костры технической конопли.

5. Использование целлюлозы, предварительно обработанной на ножевой размалывающей установке, позволяет при химической обработке снизить концентрацию кислоты в 1,6 раза.

Благодарности

Автор выражает благодарность Савенкову Сергею Сергеевичу и сельскохозяйственному кооперативу «Нетрисо» за предоставленное сырье (техническую коноплю).

Список литературы

- [1] Юртаева Л.В., Алашкевич Ю.Д., Каплев Е.В., Патраков В.А. Безножевой размол растительных полимеров при получении мелкодисперсной целлюлозы // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов, 2023. С. 380–384.
- [2] Пугачева И.Н., Енютина М.В., Никулин С.С., Седых В.А. Применение микрокристаллической целлюлозы в производстве каучуковых композитов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований, 2012. № 2. С. 128–129.
- [3] Hoenich N.A. Cellulose for Medical Applications: Past, Present, and Future // BioResources, 2006, v. 1, pp. 270–280. DOI: 10.15376/BIORES.1.2.270-280
- [4] Умаров С.З., Наркевич И.А., Костенко Н.Л., Пучнина Т.Н. Медицинское и фармацевтическое товароведение. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2003. 368 с.
- [5] Kunze J., Fink H.P. Structural changes and activation of cellulose by caustic soda solution with urea // Wiley-VCH Verlag Chemie, 2005, v. 223, no. 1, pp. 175–188.
- [6] Karakuş K., Atar I., Bozkurt F. Wood Ash and Microcrystalline Cellulose (MCC) Filled Unsaturated Polyester Composites // Kastamonu University J. of Forestry Faculty, 2017. DOI: 10.17475/kastorman.297702
- [7] Оев А.М., Оев С.А., Махкамов К.М., Марупов Р.М. Физико-химические основы применения микрокристаллической целлюлозы в щебнемасличных асфальтах // Доклады Академии наук Республики Таджикистан, 2006. № 9. С. 115–120.
- [8] Коваленко В.И. Кристаллическая целлюлоза: структура и водородные связи // Успехи химии, 2010. Т. 79. № 3. С. 261–272. DOI: 10.1070/RC2010v079n03ABEN004065
- [9] Espinosa S.C., Kuhnt T., Foster E.J., Weder C. Isolation of thermally stable cellulose nanocrystals by phosphoric acid hydrolysis // Biomacromolecules, 2013, pp. 1223–1230. DOI: 10.1021/bm400219u
- [10] Yurtaeva L.V., Alashkevich Yu.D., Marchenko R.A., Vasilyeva D.Yu., Tarazeev D.S. Obtaining fine-dispersed cellulose from annual plants // Uzbekistan Citation, 2023, v. 1231. DOI: 10.1088/1755-1315/1231/1/012030
- [11] Патент № 2147057 Российская Федерация, МПК D21C 9/00, C08B 1/02. Способ получения микрокристаллической целлюлозы / Карманов А.П., Кочева Л.С., Киселева А.А., заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет», № 99117051; заявл. 04.08.1999; опубл. 27.03.2000. 10 с.

- [12] Патент № 2155192 Российская Федерация, МПК С08В 15/02. Способ получения микрокристаллической целлюлозы / Тихомиров А.В., Буланов Р.А., заявитель и патентообладатель ОАО «Нижегородский завод «Октябрь»». № 99116394; заявл. 04.08.1999; опубл. 27.08.2000. 9 с.
- [13] Патент № 2178033 Российская Федерация, МПК D21С 1/04, С08В 15/00. Способ получения микрокристаллической целлюлозы из соломы злаковых / Кочева Л.С., Карманов А.П., Данилова Л.И., Попова М.Ф., заявитель и патентообладатель Институт химии Коми научного центра Уральского отделения РАН. № 2006126226; заявл. 19.07.2006; опубл. 10.12.2007. 12 с.
- [14] Патент № 2395636 Российская Федерация, МПК D21В 1/36, D21С 1/04, С08В 1/00, С08В 15/02. Способ получения микрокристаллической целлюлозы из автогидролизованной древесины / Кузнецов Б.Н., Данилов В.Г., Яценкова О.В., Ибрагимова Е.Ф., заявитель и патентообладатель Учреждение Российской академии наук Институт химии и химической технологии Сибирского отделения РАН (ИХХТ СО РАН). № 2009126875; заявл. 13.07.2009; опубл. 27.07.2010. 6 с.
- [15] Каплев Е.В., Юртаева Л.В. Способы получения порошковых целлюлозных материалов: Сборник материалов III Всерос. науч.-практ. конф.: Состояние окружающей среды, проблемы экологии и пути их решения, Усть-Илимск, 20–21 декабря 2021 года. Иркутск, 2022. С. 79–85.
- [16] Marchessault R.H., Morehead F.F., Walter N.M. Liquid Crystal Systems from Fibrillar Polysaccharides // *Nature*, 1959, pp. 632–633. DOI: 10.1038/184632a0
- [17] Иванов В.М., Медведев Г.А., Мищенко Е.В., Михальков Д.Е. Практикум по растениеводству. Волгоград: Изд-во Волгоградского ГАУ, 2022. 388 с.
- [18] Минич И.Б., Минич А.С., Чурсина Н.Л. Биологические основы сельского хозяйства. Томск: Изд-во ТГПУ, 2019. 64 с.
- [19] Дорофеев В.Ф. Анатомическое строение стебля некоторых видов пшеницы и его связь с полеганием // *Ботанический журнал*, 1962. № 3. С. 374–380.
- [20] Harrizul R., Regina A. Preparation and characterization of microcrystalline cellulose from rice straw using chemical and enzymatic techniques // *International Research J. of Pharmacy*, 2019, no. 10(7), pp. 27–32. DOI: 10.7897/2230-8407.1007213
- [21] Ахметшин И.Р. Получение микрокристаллической целлюлозы из лигноцеллюлозного материала, активированного паровзрывной обработкой: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.03. Казань, 2018. 133 с.
- [22] Момзякова К.С. Совершенствование технологии получения целлюлозы из травянистых растений: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.06. Казань, 2021. 150 с.
- [23] Ивлева А.Р., Канарский А.В., Казаков Я.В., Севастьянова Ю.В. Влияние лигнина и гемицеллюлозы на адсорбционные свойства растительных волокон // *Вестник технологического университета*, 2015. Т. 18. № 17. С. 123–125.
- [24] Иванкин А.Н. Химическая и биодegradация белковых компонентов растительного происхождения // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2023. Т. 27. No 1. С. 85–94. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-85-94
- [25] Кононов Г.Н., Веревкин А.Н., Сердюкова Ю.В., Хвалько Д.Д. Древесина как химическое сырье. История и современность. V. Древесная целлюлоза как природное полимерное сырье. Часть I // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2023. Т. 27. № 3. С. 128–142. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-128-142
- [26] Торлопов М.А. Способ получения микрокристаллической целлюлозы. Патент № 2528261 РФ, опубл. 10.09.2014. 7 с.
- [27] Никольский С.Н. Способ получения микрокристаллической целлюлозы. Патент № 2684082 РФ, опубл. 03.04.2019. 10 с.
- [28] Алашкевич Ю.Д., Ковалев В.И., Юртаева Л.В., Каплев Е.В., Марченко Р.А. Способ получения микрокристаллической целлюлозы. Патент № 2797202 РФ, опубл. 31.05.2023. 8 с.
- [29] Алашкевич Ю.Д. Основы теории гидродинамической обработки волокнистых материалов в размольных машинах: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.03. Ленинград, 1980. 334 с.
- [30] Кутюва Л.В. Комплексный параметр процесса обработки волокнистых суспензий безножевым способом в установке типа «струя — преграда»: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.03. Красноярск, 1998. 150 с.
- [31] Набиева А.А. Оценка влияния и совершенствование основных технологических параметров ножевых размальвающих машин: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.03. Красноярск, 2004. 182 с.
- [32] Алашкевич Ю.Д., Юртаева Л.В., Решетова Н.С., Марченко Р.А. Влияние ножевого способа размала волокнистой массы на процесс получения порошковой целлюлозы // *Химия растительного сырья*, 2020. № 4. С. 493–499.
- [33] Оболенская А.В., Ельницкая З.П., Леонович А.А. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы. М.: Экология, 1991. 320 с.
- [34] ГОСТ 6840–78 Целлюлоза. Метод определения альфа-целлюлозы. Государственный комитет СССР по стандартам. Москва, 1978. 7 с.
- [35] ISO 5267-1:1999/Cor.1:2001 Целлюлоза. Определение способности к обезвоживанию. Ч. 1. Метод Шоппер — Риглера. 8 с.
- [36] Примаков С.Ф. Лабораторный практикум по целлюлозно-бумажному производству. М.: Лесная пром-сть, 1980. 168 с.
- [37] ISO 5269-1:2005 Целлюлоза. Приготовление лабораторных листов для физических испытаний. Ч. 1. Метод с применением стандартного листоотливного аппарата. 12 с.
- [38] ISO 5270:2012 Целлюлоза. Лабораторные листы. Определение физических свойств. 20 с.
- [39] ISO 1924-2:2008 Бумага и картон. Определение прочности при растяжении. 20 с.
- [40] ISO 1974:2012 Бумага. Определение сопротивления раздиранию. Метод Эльмендорфа: описание стандарта и тендеры. 15 с.
- [41] ГОСТ 25438–82 Целлюлоза для химической переработки. Методы определения характеристической вязкости. М., 1982. 22 с.
- [42] Юртаева Л.В., Решетова Н.С., Алашкевич Ю.Д., Марченко Р.А., Каплев Е.В. Получение аналитической зависимости прочностных свойств бумаги от бумагообразующих показателей волокнистой массы // *Химия растительного сырья*, 2020. № 4. С. 501–509.
- [43] Юртаева Л.В., Алашкевич Ю.Д., Каплев Е.В., Слизилова Е.А. Влияние размала однолетних растительных полимеров на процесс получения мел-

- кодисперсной целлюлозы // Хвойные бореальной зоны, 2023. Т. 41. № 4. С. 361–368.
- [44] Segal L., Creely J.J., Martin A.E., Conrad C.M. An Empirical Method for Estimating the Degree of Crystallinity of Native Cellulose Using the X-Ray Diffractometer // *Textile Research J.*, 1959, v. 29, pp. 786–794. DOI: 10.1177/004051755902901003
- [45] Yurtayeva L.V., Alashkevich Y.D., Kaplyov E.V., Slizikova E.A., Marchenko R.A. Bio-damaged wood processing in microcrystalline cellulose production // *BioResources*, 2023, no. 18(4), pp. 8284–8295.
- [46] Петрова А.А. Влияние характера полости размола ножевой гарнитуры с пространственным расположением ножей на градус помола волокнистой массы // *Chronos*, 2022. Т. 7. № 4(66). С. 57–59.
- [47] Kale R.D., Bansal P.S., Gorade V.G. Extraction of microcrystalline cellulose from cotton sliver and its comparison with commercial microcrystalline cellulose // *J. of Polymers and the Environment*, 2018, no. 26, pp. 355–364. DOI: <http://doi.org/10.1007/S10924-017-0936-2>
- [48] Li T., Chen C., Brozena A.H., Hu L., Zhu J.Y. Developing fibrillated cellulose as a sustainable technological material // *Nature*, 2021, v. 590, no. 7844, pp. 47–56. DOI: 10.1038/s41586-020-03167-7
- [49] Queiroz L.P., Kerins B.M., Yadav J., Farag F., Faisal W., Crowley M.E., Lawrence S.E. Investigating microcrystalline cellulose crystallinity using Raman spectroscopy // *Cellulose*, 2021, no. 28, pp. 8971–8985. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-021-04093-1>
- [50] Макарова Е.И., Будаева В.В., Золотухин В.Н., Люханова И.В., Алешина Л.А. К вопросу о роли степени кристалличности целлюлозы при ферментативном гидролизе // *Ползуновский вестник*, 2013. № 3. С. 188–193.

Сведения об авторе

Юртаева Лариса Владимировна — канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», 2052727@mail.ru

Поступила в редакцию 12.01.2024.

Одобрено после рецензирования 29.03.2024.

Принята к публикации 13.02.2025.

MICROCRYSTALLINE CELLULOSE PRODUCTION FROM ANNUAL PLANTS WITH SLUSH PREHYDROLYSIS REFINING

L.V. Yurtaeva

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 31, Krasnoyarskii rabochii av., 660037, Krasnoyarsk, Russia

2052727@mail.ru

The widespread use of microcrystalline cellulose in various industries and the production of polymer composites from it is due to the growing demand for it as an alternative to non-renewable and scarce fossil materials. Despite the fact that the production of microcrystalline cellulose still has some disadvantages, it has recently attracted increasing interest due to its renewability, non-toxicity, economic value, biodegradability, high mechanical properties, large surface area and biocompatibility. The article shows the possibility of obtaining microcrystalline cellulose from alternative sources of raw materials to expensive business wood — annual plants. Sulfate cooking of annual plant samples (industrial hemp and wheat straw) was performed in a laboratory autoclave under constant conditions: hydromodule 4,5; degree of sulfidity of the cooking solution 18 %; temperature 160 °C. To destroy the outer surface of the fiber shell, increase their active surface and reduce the cost of chemical treatment, the fibrous mass was ground in a semi-industrial disc mill (refining degree 15...85 °C). The water retention capacity of cellulose fibers from industrial hemp bonfires increased by 2,2 times, wheat straw by 2 times, the breaking length respectively by 64 and 52 %, and the penetration by 40 and 34 %. The cellulose samples were hydrolyzed with hydrochloric acid concentration of 73 g/l at 15 °C for 30 minutes and 54,75 g/l at 80 °C for 60 minutes. The degree of polymerization was determined by a viscometric method. The best results were achieved with a refining degree of 85 °C at the campfire of technical hemp — the degree of polymerization is 55, the bulk density is 0,316 g/ml, wheat straw is 95 and 0,239 g/ml, respectively. Thus, the possibility of obtaining microcrystalline cellulose from agricultural waste (bonfires of industrial hemp and wheat straw) with preliminary prehydrolysis refining in a semi-industrial disc mill is shown.

Keywords: refining, microcrystalline cellulose, hydrolysis, fibrillation, annual plants

Suggested citation: Yurtaeva L.V. *Poluchenie mikrokristallicheskoy tsellyulozy iz odnoletnikh rasteniy s predgidroliznym razmolom voloknistoy massy* [Microcrystalline cellulose production from annual plants with slush prehydrolysis refining]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 2, pp. 120–134. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-2-120-134

References

- [1] Yurtaeva L.V., Alashkevich Yu.D., Kaplyov E.V., Patrakov V.A. *Beznozhevoy razmol rasti-tel'nykh polimerov pri poluchenii melkodispersnoy tsellyulozy* [Knife-free grinding of plant polymers in the production of fine cellulose]. *Problemy mekhaniki tsellyulozno-bumazhnykh materialov* [Problems of mechanics of pulp and paper materials], 2023, pp. 380–384.
- [2] Pugacheva I.N., Enyutina M.V., Nikulin S.S., Sedykh V.A. *Primenenie mikrokristalli-cheskoy tsellyulozy v proizvodstve kauchukovykh kompozitov* [The use of microcrystalline cellulose in the production of rubber composites]. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International J. of Applied and Fundamental Research], 2012, no. 2, pp. 128–129.
- [3] Hoenich N.A. Cellulose for Medical Applications: Past, Present, and Future. *BioResources*, 2006, v. 1, pp. 270–280. DOI: 10.15376/BIORES.1.2.270-280
- [4] Umarov S.Z., Narkevich I.A., Kostenko N.L., Puchinina T.N. *Meditinskoe i farmatsevti-cheskoe tovarovedenie* [Medical and pharmaceutical commodity science]. Moscow: GEOTAR-MED, 2003, 368 p.
- [5] Kunze J., Fink H.P. Structural changes and activation of cellulose by caustic soda solution with urea. *Wiley-VCH Verlag Chemie*, 2005, v. 223, no. 1, pp. 175–188.
- [6] Karakuş K., Atar I., Bozkurt F. Wood Ash and Microcrystalline Cellulose (MCC) Filled Unsaturated Polyester Composites. *Kastamonu University J. of Forestry Faculty*, 2017. DOI: 10.17475/kastorman.297702
- [7] Oev A.M., Oev S.A., Makhkamov K.M., Marupov R.M. *Fiziko-khimicheskie osnovy prime-neniya mikrokristallicheskoy tsellyulozy v shchebnemastichnykh asfal'takh* [Physico-chemical bases of application of microcrystalline cellulose in crushed stone mastic asphalt]. *DAN RT*, 2006, no. 9, pp. 115–120.
- [8] Kovalenko V.I. *Kristallicheskaya tsellyuloza: struktura i vodorodnye svyazi* [Crystalline cellulose: structure and hydrogen bonds]. *Uspekhi khimii* [Advances in chemistry], 2010, v. 79, no. 3, pp. 261–272. DOI: 10.1070/RC2010v079n03ABEH004065
- [9] Espinosa S.C., Kuhnt T., Foster E.J., Weder C. Isolation of thermally stable cellulose nanocrystals by phosphoric acid hydrolysis. *Biomacromolecules*, 2013, pp. 1223–1230. DOI: 10.1021/bm400219u
- [10] Yurtaeva L.V., Alashkevich Yu.D., Marchenko R.A., Vasilyeva D.Yu., Tarazeev D.S. Obtaining fine-dispersed cellulose from annual plants. *Uzbekistan Citation*, 2023, v. 1231. DOI: 10.1088/1755-1315/1231/1/012030

- [11] Karmanov A.P., Kocheva L.S., Kiseleva A.A. *Sposob polucheniya mikrokrystallicheskoj tsellyulozy* [A method for producing microcrystalline cellulose]. Pat. 2147057 RF, publ. 27.03.2000.
- [12] Tikhomirov A.V., Bulanov R.A. *Sposob polucheniya mikrokrystallicheskoj tsellyulozy* [A method for producing microcrystalline cellulose]. Pat. 2155192 RF, publ. 27.08.2000.
- [13] Kocheva L.S., Karmanov A.P., Danilova L.I., Popova M.F. *Sposob polucheniya mikrokrystallicheskoj tsellyulozy iz solomy zlakovykh* [A method for producing microcrystalline cellulose from cereal straw]. Pat. 2178033 RF, publ. 10.12.2007.
- [14] Kuznetsov B. N., Danilov V. G., Yatsenkova O. V., Ibragimova E. F. *Sposob polucheniya mikrokrystallicheskoj tsellyulozy iz avtogidrolizovannoy drevesiny* [A method for producing microcrystalline cellulose from autohydrolyzed wood]. Pat. 2395636 RF, publ. 27.07.2010.
- [15] Kaplev E.V., Yurtaeva L.V. *Sposoby polucheniya poroshkovykh tsellyuloznykh materialov* [Methods for the production of powdered cellulose materials]. *Sostoyanie okruzhayushchey sredy, problemy ekologii i puti ikh resheniya* [The state of the environment, environmental problems and ways to solve them], 2022, pp. 79–85.
- [16] Marchessault R.H., Morehead F.F., Walter N.M. Liquid Crystal Systems from Fibrillar Polysaccharides. *Nature*, 1959, pp. 632–633. DOI: 10.1038/184632a0
- [17] Ivanov V.M., Medvedev G.A., Mishchenko E.V., Mikhal'kov D.E. *Praktikum po rastenievodstvu* [Practical training on crop production]. Volgograd: Volgograd State University, 2022, 388 p.
- [18] Minich I.B., Minich A.S., Chursina N.L. *Biologicheskie osnovy sel'skogo khozyaystva* [Biological foundations of agriculture]. Tomsk: TGPU, 2019, 64 p.
- [19] Dorofeev V.F. *Anatomicheskoe stroenie steblya nekotorykh vidov pshenitsy i ego svyaz' s poleganiem* [Anatomical structure of the stem of some wheat species and its relation to lodging]. *Botanicheskiy zhurnal* [Botanical Journal], 1962, no. 3, pp. 374–380.
- [20] Harrizul R., Regina A. Preparation and characterization of microcrystalline cellulose from rice straw using chemical and enzymatic techniques. *International Research J. of Pharmacy*, 2019, no. 10(7), pp. 27–32. DOI: 10.7897/2230-8407.1007213
- [21] Akhmetshin I.R. *Poluchenie mikrokrystallicheskoj tsellyulozy iz lignotsellyuloznogo materiala, aktivirovannogo parovzryvnoy obrabotkoy* [Production of microcrystalline cellulose from lignocellulose material activated by steam blasting]. *Dis. Cand. Sci. (Tech.)*. 05.21.03. Kazan, 2018, 133 p.
- [22] Momzyakova K.S. *Sovershenstvovanie tekhnologii polucheniya tsellyulozy iz travyanistykh rasteniy* [Improving the technology of obtaining cellulose from herbaceous plants]. *Dis. Cand. Sci. (Tech.)*. 05.17.06. Kazan, 2021, 150 p.
- [23] Ivleva A.R., Kanarskiy A.V., Kazakov Ya.V., Sevast'yanova Yu.V. *Vliyanie lignina i gemitsellyulozy na adsorbtsionnye svoystva rastitel'nykh volokon* [The effect of lignin and hemicellulose on the adsorption properties of plant fibers]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2015, v. 18, no. 17, pp. 123–125.
- [24] Ivankin A.N. *Khimicheskaya i biodegradatsiya belkovykh komponentov rastitel'nogo proiskhozhdeniya* [Chemical and biological degradation of phytochemical components]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 1, pp. 85–94. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-85-94
- [25] Kononov G.N., Verevkin A.N., Serdyukova Yu.V., Khval'ko D.D. *Drevesina kak khimicheskoe syr'e. Istoriya i sovremennost'. V. Drevesnaya tsellyuloza kak prirodnoe polimernoe syr'e. Chast' I* [Wood as chemical raw material. History and modernity. V. Wood pulp as natural polymer raw material. Part I]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 3, pp. 128–142. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-128-142
- [26] Torlopov M.A. *Sposob polucheniya mikrokrystallicheskoj tsellyulozy* [A method for producing microcrystalline cellulose]. Pat. 2528261 RF, publ. 10.09.2014.
- [27] Nikol'skiy S.N. *Sposob polucheniya mikrokrystallicheskoj tsellyulozy* [A method for producing microcrystalline cellulose]. Pat. 2684082 RF, publ. 03.04.2019.
- [28] Alashkevich Yu.D., Kovalev V.I., Yurtaeva L.V., Kaplev E.V., Marchenko R.A. *Sposob polucheniya mikrokrystallicheskoj tsellyulozy* [A method for producing microcrystalline cellulose]. Pat. 2797202 RF, publ. 31.05.2023.
- [29] Alashkevich Yu.D. *Osnovy teorii gidrodinamicheskoy obrabotki voloknistykh materialov v razmol'nykh mashinakh* [Fundamentals of the theory of hydrodynamic processing of fibrous materials in grinding machines]. *Dis. Dr. Sci. (Tech.)*. 05.21.03. Leningrad, 1980, 334 p.
- [30] Kutovaya L.V. *Kompleksnyy parametr protsessa obrabotki voloknistykh suspenziy beznozhevym sposobom v ustanovke tipa «struya — pregrada»* [A complex parameter of the process of processing fibrous suspensions with a knife-free method in a jet — barrier type installation]. *Dis. Cand. Sci. (Tech.)*. 05.21.03. Krasnoyarsk, 1998, 150 p.
- [31] Nabieva A.A. *Otsenka vliyaniya i sovershenstvovanie osnovnykh tekhnologicheskikh para-metrov nozhevykh razmalyvayushchikh mashin* [Assessment of the impact and improvement of the main technological parameters of knife grinding machines]. *Dis. Cand. Sci. (Tech.)*. 05.21.03. Krasnoyarsk, 2004, 182 p.
- [32] Alashkevich Yu.D., Yurtaeva L.V., Reshetova N.S., Marchenko R.A. *Vliyanie nozhevogo spo-soba razmola voloknistoy massy na protsess polucheniya poroshkovoy tsellyulozy* [The effect of the knife method of grinding fibrous mass on the process of obtaining powdered cellulose]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw materials], 2020, no 4, pp. 493–499.
- [33] Obolenskaya A.V., El'nitskaya Z.P., Leonovich A.A. *Laboratornye raboty po khimii dre-vesiny i tsellyulozy* [Laboratory work on wood and pulp chemistry]. Moscow: Ecology, 1991, 320 p.
- [34] GOST 6840–78 *Tsellyuloza. Metod opredeleniya al'fa-tsellyulozy* [Cellulose. Method of determination of alpha cellulose]. Moscow: Gosudarstvennyy komitet SSSR po standartam [USSR State Committee on Standards], 1978, 7 p.
- [35] ISO 5267-1:1999/Cor.1:2001 *Tsellyuloza. Opredelenie sposobnosti k obezvozhivaniyu. Chast' 1. Metod Shopper — Riglera* [Cellulose. Determination of the ability to dehydrate. Part 1. Shopper-Rigler Method], 8 p.

- [36] Primakov S.F. *Laboratornyy praktikum po tsellyulozno-bumazhnomu proizvodstvu* [Laboratory workshop on pulp and paper production]. Moscow: Forest industry, 1980, 168 p.
- [37] ISO 5269-1:2005 *Tsellyuloza. Prigotovlenie laboratornykh listov dlya fizicheskikh ispytaniy. Chast' 1. Metod s primeneniem standartnogo listootlivnogo apparata* [Cellulose. Preparation of laboratory sheets for physical tests. Part 1. The method using a standard leaf-watering device], 12 p.
- [38] ISO 5270:2012 *Tsellyuloza. Laboratornye listy. Opredelenie fizicheskikh svoystv* [Cellulose. Laboratory sheets. Determination of physical properties], 20 p.
- [39] ISO 1924-2:2008 *Bumaga i karton. Opredelenie prochnosti pri rastyazhenii* [Paper and cardboard. Determination of tensile strength], 20 p.
- [40] ISO 1974:2012 *Bumaga. Opredelenie soprotivleniya razdiraniyu. Metod El'mendorfa: opisaniye standarta i tendery* [Paper. Determination of tear resistance. Elmendorf method: description of the standard and tenders], 15 p.
- [41] GOST 25438–82 *Tsellyuloza dlya khimicheskoy pererabotki. Metody opredeleniya kharakteristicheskoy vyazkosti* [Cellulose for chemical processing. Methods for determining the characteristic viscosity], Moscow, 1982, 22 p.
- [42] Yurtaeva L.V., Reshetova N.S., Alashkevich Yu.D., Marchenko R.A., Kaplev E.V. *Poluchenie analiticheskoy zavisimosti prochnostnykh svoystv bumagi ot bumagoobrazuyushchikh pokazateley voloknistoy massy* [Obtaining analytical dependence of paper strength properties on paper-forming parameters of fibrous mass]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of vegetable raw materials], 2020, no. 4, pp. 501–509.
- [43] Yurtaeva L.V., Alashkevich Yu.D., Kaplev E.V., Slizikova E.A. *Vliyanie razmola odnoletnikh rastitel'nykh polimerov na protsess polucheniya melkodispersnoy tsellyulozy* [The effect of grinding annual plant polymers on the process of obtaining fine cellulose]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Coniferous trees of the boreal zone], 2023, v. 41, no. 4, pp. 361–368.
- [44] Segal L., Creely J.J., Martin A.E., Conrad C.M. An Empirical Method for Estimating the Degree of Crystallinity of Native Cellulose Using the X-Ray Diffractometer // *Textile Research J.*, 1959, v. 29, pp. 786–794.
DOI: 10.1177/004051755902901003
- [45] Yurtayeva L.V., Alashkevich Y.D., Kaplyov E.V., Slizikova E.A., Marchenko R.A. Bio-damaged wood processing in microcrystalline cellulose production. *BioResources*, 2023, no. 18(4), pp. 8284–8295.
- [46] Petrova A.A. *Vliyanie kharaktera polosti razmola nozhevoy garnitury s prostranstvennym raspolozheniem nozhey na gradus pomola voloknistoy massy* [The influence of the nature of the grinding cavity of a knife set with a spatial arrangement of knives on the degree of grinding of a fibrous mass]. *Chronos*, 2022, v. 7, no. 4(66), pp. 57–59.
- [47] Kale R.D., Bansal P.S., Gorade V.G. Extraction of microcrystalline cellulose from cotton sliver and its comparison with commercial microcrystalline cellulose. *J. of Polymers and the Environment*, 2018, no. 26, pp. 355–364.
DOI: <http://doi.org/10.1007/S10924-017-0936-2>
- [48] Li T., Chen C., Brozena A.H., Hu L., Zhu J.Y. Developing fibrillated cellulose as a sustainable technological material. *Nature*, 2021, v. 590, no. 7844, pp. 47–56. DOI: 10.1038/s41586-020-03167-7
- [49] Queiroz L.P., Kerins B.M., Yadav J., Farag F., Faisal W., Crowley M.E., Lawrence S.E. Investigating microcrystalline cellulose crystallinity using Raman spectroscopy. *Cellulose*, 2021, no. 28, pp. 8971–8985.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-021-04093-1>
- [50] Makarova E.I., Budaeva V.V., Zolotukhin V.N., Lyukhanova I.V., Aleshina L.A. *K voprosu o roli stepeni kristallichnosti tsellyulozy pri fermentativnom gidrolize* [On the role of the degree of crystallinity of cellulose in enzymatic hydrolysis]. *Polzunovskiy vestnik* [Polzunovsky vestnik], 2013, no. 3, pp. 188–193.

Acknowledgments

The author would like to thank Sergey Sergeyevich Savenkov and the agricultural co-operative society «Hempico» for providing the raw material (technical hemp).

Author's information

Yurtaeva Larisa Vladimirovna — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 2052727@mail.ru

Received 12.01.2024.

Approved after review 29.03.2024.

Accepted for publication 13.02.2024.

АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ЛЕСНОГО КОМПЛЕКСА

Г.И. Кольниченко[✉], Я.В. Тарлаков, М.С. Усачев

МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

g_kolnic@mail.ru

Приведено описание нового метода расчета электрических параметров систем электроснабжения, основу которого составляют универсальные формулы для определения собственных и взаимных сопротивлений. Эти формулы, полученные авторами в результате матричных преобразований системы узловых уравнений, дают возможность рассчитать искомые параметры электрических режимов точным методом в пределах нескольких циклов расчета. Повторение циклов продиктовано необходимостью учета нелинейности отдельных элементов систем электроснабжения (генераторов, нагрузок и др.). Предложенный метод снимает проблему сходимости итерационного процесса счета используемых ныне расчетных методов. Он дает быстрое и надежное получение решения задач расчета установившихся режимов систем электроснабжения и может быть использован в задачах исследования их переходных режимов. Это подтверждено практикой его применения в режимных расчетах систем электроснабжения лесного и агропромышленного комплекса, а также государственных энергосистем и систем электроснабжения оборонных объектов страны.

Ключевые слова: системы электроснабжения, метод электрического расчета, алгоритм и программа расчета, прямые и итерационные методы

Ссылка для цитирования: Кольниченко Г.И., Тарлаков Я.В., Усачев М.С. Алгоритмизация электрических расчетов систем электроснабжения предприятий лесного комплекса // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 2. С. 135–146. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-2-135-146

Расчеты установившихся режимов при создании, эксплуатации и развитии систем электроснабжения выполняются чаще других расчетов, поскольку они необходимы для определения допустимых и оптимальных режимов, проверки статической и динамической устойчивости, анализа надежности и др. [1–7].

Эффективность таких расчетов в значительной степени зависит от используемых расчетных методов. В настоящее время разработаны программы для ЭВМ, реализующие методы, которые обладают различными свойствами в зависимости от целей и видов расчета электрических систем и их режимов [8–19].

Сопоставление расчетных методов — не простая задача. Нельзя однозначно ответить на вопрос, какой метод лучше.

По построению процесса расчета методы могут быть следующих типов:

– прямые — в случае определения искомых величин в один шаг, например путем решения системы линейных уравнений;

– итерационные — в случае определения искомых величин за много шагов для постепенного уточнения получения результатов.

Накоплен достаточно большой опыт практических расчетов установившихся режимов на ЭВМ, который убедительно свидетельствует о наибольшей эффективности применения уравнений, записанных в виде нелинейных уравнений узловых напряжений. Эти уравнения описывают установившийся режим электрической системы при задании нелинейных источников тока. В схеме замещения электрической системы нелинейными источниками тока являются генераторы и нагрузки потребителей, токи которых нелинейно зависят от приложенного к ним напряжения.

Расчет установившегося режима сложной электроэнергетической системы сводится к решению системы нелинейных алгебраических уравнений, которые решаются одним из итерационных методов. Недостатком таких методов является то, что сходимость итерационного процесса в некоторых известных и распространенных случаях может оказаться замедленной или вообще необеспеченной. Это касается прежде всего схем с высокой степенью неоднородности параметров, схем с продольной емкостной компенсацией, с трехобмоточными трансформаторами с очень малым сопротивлением средней обмотки, а также расчетов

электрических режимов, близких к предельным по соображениям статической устойчивости [20–26].

В связи с этим возникла необходимость разработать метод электрического расчета систем электроснабжения, отвечающего требованиям удобства реализации на ЭВМ и снимающего проблему сходимости итерационного процесса счета.

Цель работы

Цель работы — разработка метода расчета электрических параметров систем электроснабжения, на основе универсальных формул для определения собственных и взаимных сопротивлений.

Объекты и методы исследования

В Мытищинском филиале МГТУ им. Н.Э. Баумана был разработан такой метод и на его основе созданы алгоритмы расчетов параметров установившегося режима систем электроснабжения предприятий лесного и агропромышленного комплексов страны [27].

Особенность метода заключается в применении точного метода расчета собственных и взаимных значений сопротивлений, используемых для определения искомых параметров установившихся режимов (токов, напряжений, мощностей) в пределах нескольких циклов расчета.

Повторение циклов расчета связано с необходимостью учета нелинейности проводимости генераторов и нагрузок, что достигается корректировкой их значений в зависимости от уровня напряжений (или токов), уточняющихся в каждом цикле расчета.

Систему уравнений узловых напряжений при направлении токов к узловым точкам можно записать в виде

$$\sum_{j=0}^l y_{ij}(\dot{U}_j - \dot{U}_i) + \sum_{J=1}^m y_{Ji}(\dot{E}_J - \dot{U}_i) + \sum_{\alpha=1}^S y_{i0(\alpha)}(-\dot{U}_i) = 0; \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

где n — число узлов в схеме;

i, j — номера узлов, принадлежащих ветви сети (или нескольким ветвям, включенным параллельно между этими узлами);

l — число ветвей сети, включенных в узел i ;

m — число генераторных ветвей, присоединенных к этому узлу;

S — число нагрузок, включенных в узел i ;

α — номера нагрузочных ветвей узла i .

Из полной матрицы коэффициентов системы уравнений (1) можно выделить квадратную симметричную матрицу коэффициентов при узловых напряжениях Y , порядок, который равен числу узлов n в схеме (см. выражение (11)).

Матричные преобразования системы уравнений (1) позволили получить универсальные выражения для расчета собственных и взаимных сопротивлений в виде:

$$Z_{JJ} = \frac{Z_{Ji}^2}{Z_{Ji} + Z_{ii}^*}; \quad (2)$$

$$Z_{JF} = \frac{Z_{Ji}Z_{Fj}}{Z_{ij}^*}; \quad (3)$$

$$Z_{i0;F} = \frac{Z_{i0}Z_{Fj}}{Z_{ij}^*}; \quad (3a)$$

$$Z_{ij;Pm} = \frac{Z_{ij}Z_{Pm}}{Z_{jm}^* - Z_{im}^*}. \quad (4)$$

где Z_{JJ} — собственное сопротивление J -й генераторной ветви, включенной в узел i ;

Z_{JF} — взаимное сопротивление между генераторными ветвями Ji и Fj ;

$Z_{i0;F}$ — взаимное сопротивление между генераторной ветвью Fj и нагрузочной ветвью $i0$;

$Z_{ij;Pm}$ — взаимное сопротивление между генераторной ветвью Pm и ветвью ij ;

$Z_{Ji}, Z_{Fj}, Z_{Pm}, Z_{i0}, Z_{ij}$ — сопротивления ветвей электрической системы, относительно которых определяются собственные и взаимные сопротивления;

$Z_{ii}^*, Z_{ij}^*, Z_{im}^*, Z_{jm}^*$ — соответствующие элементы обращенной матрицы узловых проводимостей $Y^{-1} = Z^*$, содержащие в индексах номера узлов, в которые включены рассматриваемые ветви;

J, F, P — номера генераторов электрической системы;

i, j, m — номера узлов сети, к которым присоединены генераторы, нагрузки и ветви сети [28];

индекс «*» отличает элементы обращенной матрицы $Y^{-1} = Z^*$ от сопротивлений схемы;

Y — неособенная матрица, т. е. ее определитель не равен нулю (это положение известно, начиная с Кирхгофа [29–35]).

Для всякой неособенной матрицы существует обратная матрица. Другими словами, невырожденность матрицы Y означает, что всегда

существует матрица $Y^{-1} = Z^*$ и, следовательно, выражения (2) — (4) универсальны, т. е. они пригодны для расчета собственных и взаимных сопротивлений в электрических системах постоянного и переменного тока любой конфигурации и принципиально любой сложности.

Собственные и взаимные сопротивления, определяемые по формулам (2) — (4), позволяют рассчитывать параметры режимов электрических систем. Принципиальная блок-схема алгоритма электрического расчета систем электроснабжения представлена на рис. 1.

В качестве исходных (см. рис. 1, блок 1) для расчетов установившихся режимов должны быть заданы следующие данные:

- сопротивления и проводимости линий электропередачи (ЛЭП), генераторных ветвей, трансформаторов и других продольных элементов электрической системы;
- проводимости и сопротивления нагрузочных ветвей;
- другие проводимости на землю (емкостные проводимости высоковольтных ЛЭП, реакторов и т. д.);
- информация о топологической схеме (схеме соединения) системы электроснабжения (например, таковой является информация в виде номеров узлов, к которым присоединены ветви).

Параметры всех элементов расчетной схемы должны быть выражены в именованных единицах, т. е. все сопротивления схемы выражаются в омах. Как известно, сопротивления различных элементов расчетной схемы задают в разных единицах измерения. Для их определения в именованных единицах в электроэнергетической литературе даны соответствующие формулы, с помощью которых все сопротивления расчетной схемы не только выражены в омах, но и приводятся к одному и тому же базисному напряжению, т. е. к среднему напряжению одной и той же электрической ступени [1].

Приведение сопротивления, выраженного в омах, к выбранному базисному напряжению, выполняют по формуле

$$z' = (k_1 \cdot k_2 \dots k_n)^2 z, \quad (5)$$

где k_1, k_2, k_n — коэффициенты трансформации трансформаторов, через которые сопротивление z связано со ступенью базисного напряжения; коэффициенты трансформации определяют в направлении от выбранной базисной ступени к той ступени, на которой включено рассматриваемое сопротивление. Если в целях упрощения для каждой электрической ступени принять определенное среднее напряжение, то коэффициенты трансформации, используемые для приведения

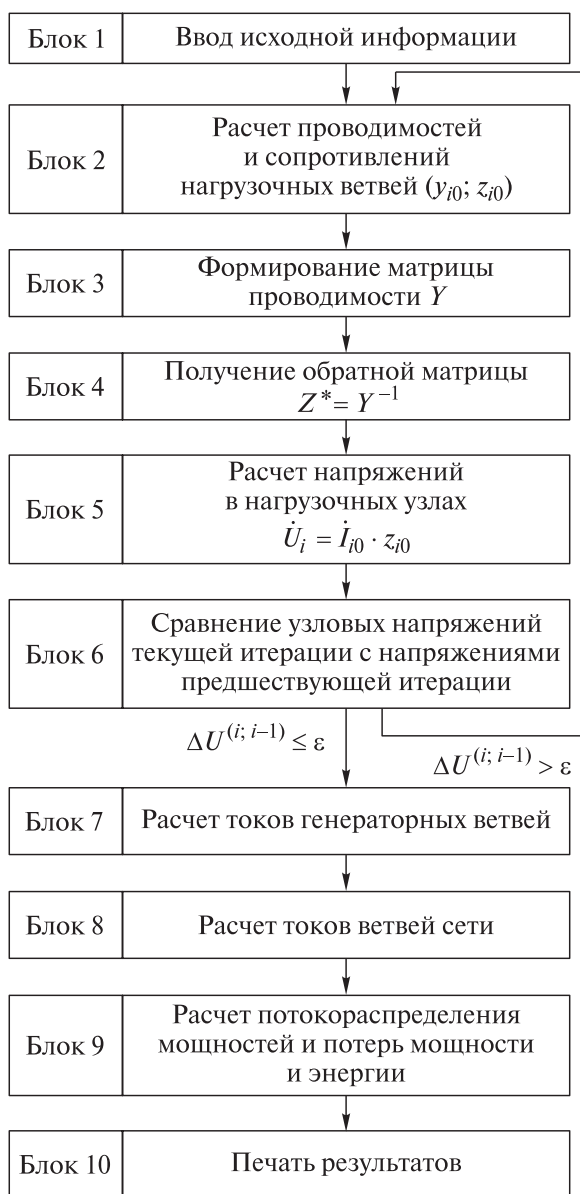


Рис. 1. Принципиальная блок-схема программы электрического расчета систем электроснабжения

Fig. 1. Principal block diagram of the electrical calculation programme for power supply systems

сопротивлений, представляют собой отношения средних напряжений двух ступеней. В связи с тем, что для каждой ступени принято среднее напряжение, промежуточные коэффициенты трансформации сокращаются, и пересчет сопротивлений можно вести по формуле

$$z' = z \frac{U_{\delta}^2}{U_{cp}^2}, \quad (6)$$

где z — сопротивление элемента, заданное при среднем напряжении U_{cp} ступени, на которой включен данный элемент, Ом; z' — сопротивление, приведенное к принятому базисному напряжению U_{δ} , Ом.

Нагрузки можно задавать либо мощностями (или токами) или статическими характеристиками, отражающими нелинейные зависимости мощностей нагрузок от приложенного напряжения, что необходимо для представления нагрузки в виде сопротивления (проводимости) на любом этапе расчета (см. рис. 1, блок 2).

Сопротивления z (проводимости $y = 1/z$) нагрузки в цепях однофазного и трехфазного тока рассчитываются по величине мощности, напряжения или тока по формулам:

– для однофазных цепей при известном (заданном) напряжении

$$z = \frac{|U|^2}{\hat{S}}; \quad (7)$$

или при известном (заданном) токе

$$z = \frac{\hat{S}}{|I|^2}; \quad (8)$$

– для трехфазных цепей при известном (заданном) напряжении

$$z = \sqrt{3} \frac{|U|^2}{\hat{S}}; \quad (9)$$

или при известном (заданном) токе

$$z = \sqrt{3} \frac{\hat{S}}{|I|^2}. \quad (10)$$

В формулах (9) и (10) S — трехфазная мощность; U и I — линейные напряжение и сила тока соответственно.

По приведенным значениям сопротивлений вычисляются проводимости, которые входят в состав элементов матрицы Y (см. рис. 1, блок 3), исходя из того, что диагональные элементы ($-y_{ii}$) матрицы Y — это полные узловые проводимости (т. е. сумма проводимостей всех ветвей, подключенных к узлу i) с обратным знаком.

Недиагональными элементами матрицы $y_{ij} = 1/z_{ij}$ являются проводимости ветвей, соединяющих узлы i и j . Если узлы i и j не принадлежат одной ветви, то $y_{ij} = 0$. Примечательным свойством матрицы Y является большое количество нулевых элементов. Объясняется это тем, что в реальных схемах электрических систем каждый узел связан лишь с небольшим количеством соседних узлов. А если узлы не соединены ветвью между собой, то и проводимость на пересечении i -й строки и j -го столбца матрицы Y равна нулю.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлена схема реальной электрической сети, в которой нагрузки получают электроэнергию от двух источников (А и Б), на шинах которых с помощью силовых трансформаторов с регулированием напряжения под нагрузкой поддерживается постоянство напряжений $\dot{U}_I = 115$ кВ и $\dot{U}_{II} = 39 \angle 3^\circ$ кВ. Линии электропередачи W_1 и W_2 связывают источники I и II с подстанциями 10 кВ в узлах 3, 4, 6 через трехфазный трехобмоточный силовой трансформатор мощностью 63 000 кВ, 1А (63 МВ, 1А) с номинальными напряжениями обмоток 115/38,5/11 кВ. Протяженности ЛЭП и марки проводов указаны на схеме (см. рис. 2).

На рис. 3 приведена расчетная схема замещения, параметры которой приведены к ступени 11 кВ и представлены к расчету в именованных единицах.

В качестве примера рассчитаем значение приведенного сопротивления линии электропередачи W_1 (ЛЭП — 11 кВ) с удельным сопротивлением $z_0 = 0,13 + j0,44$ Ом/км и протяженностью $l = 80$ км:

$$z_{15} = z_0 1/K_{н.н., в.н}^2 = (0,13 + j0,44) 18010,0956^2 = 0,095 + j0,322 \text{ Ом},$$

где $K_{н.н., в.н} = \frac{U_{н.н.}}{U_{в.н.}} = \frac{11}{115} = 0,0956$ — коэффициент

трансформации между обмоткой соответственно низшего (н.н) и высшего (в.н) напряжения.

Аналогично рассчитаны сопротивления (z) и проводимости ($y = 1/z$) остальных элементов электрической системы (см. рис. 3), с помощью которых и формируется матрица Y коэффициентов при узловых напряжениях.

Матрица Y имеет порядок, равный числу узлов сети $n = 6$ (см. рис. 3)

$$Y = \begin{pmatrix} -y_{11} & y_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ y_{21} & -y_{22} & y_{23} & 0 & y_{25} & 0 \\ 0 & y_{32} & -y_{33} & y_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & y_{43} & -y_{44} & 0 & y_{46} \\ 0 & y_{52} & 0 & 0 & -y_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & y_{64} & 0 & -y_{66} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Как отмечено выше, матрица Y всегда симметричная, так как $y_{ij} = y_{ji}$ (т. е. $y_{12} = y_{21}$, $y_{23} = y_{32}$ и т. д.), в ней i и j — номера узлов сети (т. е. номера строк и столбцов).

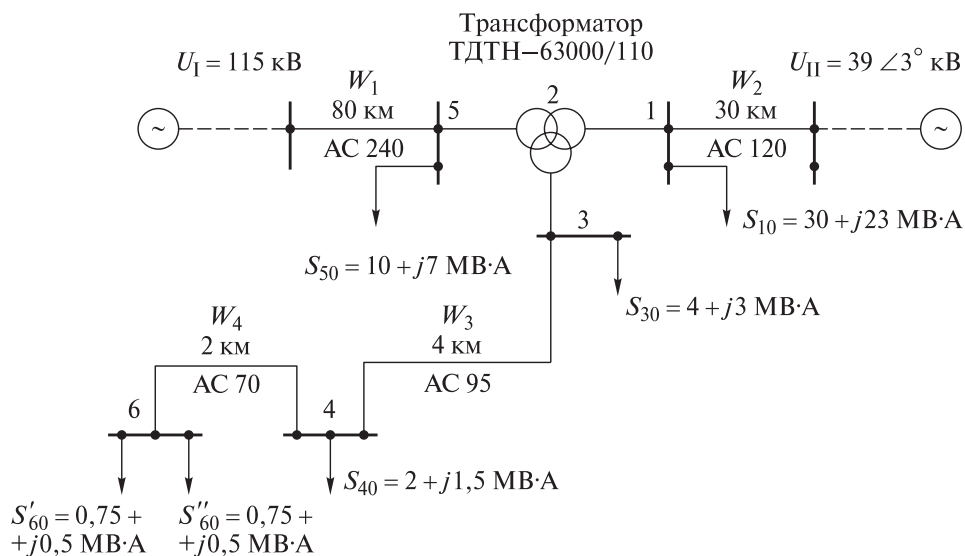


Рис. 2. Схема электрической сети: линии электропередачи, кВт: W_1 — 110; W_2 — 35; W_3 , W_4 — 10
Fig. 2. Scheme of the electric network: power lines, kW: W_1 — 110; W_2 — 35; W_3 , W_4 — 10

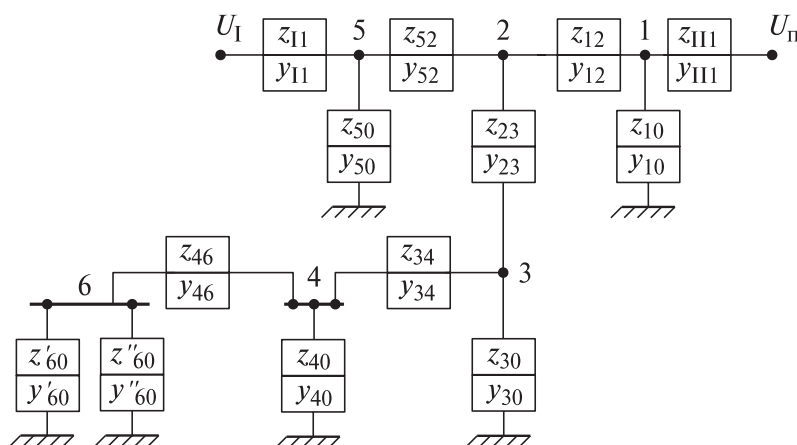


Рис. 3. Расчетная схема замещения электрической сети
Fig. 3. Calculated equivalent electric circuit model

Диагональные элементы рассчитываются как обратная по знаку сумма проводимостей ветвей, сходящихся в узле. Например, $-y_{11} = -(y_{12} + y_{11} + y_{10})$; $-y_{22} = -(y_{21} + y_{23} + y_{25})$; $-y_{33} = -(y_{30} + y_{32} + y_{34})$ и т. д.

Нужные проводимости ветвей для вычисления диагонального элемента извлекаются из массива проводимостей исходной информации по номеру узла, к которому эти ветви подключены.

После обращения матрицы Y получается матрица $Z^* = Y^{-1}$, которая также обладает свойством симметрии, однако без нулевых элементов. С ее помощью рассчитываются собственные и вза-

имные сопротивления по формулам (2) — (4). Каждое из этих сопротивлений является коэффициентом пропорциональности между напряжением источника и составляющей тока, которую источник поставляет в ветви сети.

Полный ток каждой ветви схемы равен сумме составляющих от действия каждого источника, т. е. количество составляющих тока равно количеству источников электроэнергии (генераторов). По схеме на рис. 2 ток каждой ветви имеет две составляющие ($I_{I; ij} + I_{II; ij}$) соответственно от источников с напряжением U_I и U_{II} . При их вычислении программа обращается к формулам (2) — (4) в зависимости от вида

Т а б л и ц а 1

Численные значения элементов матрицы Y Numerical values of Y matrix elements

Номер столбца	Номер строки					
	1	2	3	4	5	6
1	$-217,96 + j0,834$	217,39	0	0	0	0
2	217,39	$-217,8 + j13,05$	$0,299 - j8,05$	0	$0,115 - j4,997$	0
3	0	$0,299 - j8,05$	$-0,67 + j8,473$	$0,351 - j0,26$	0	0
4	0	0	$0,351 - j0,26$	$-1,062 + j0,788$	0	$0,701 - j0,52$
5	0	$0,115 - j4,997$	0	0	$-1,01 + j7,89$	0
6	0	0	0	$0,701 - j0,52$	0	$-0,709 + j0,525$

Т а б л и ц а 2

Численные значения элементов матрицы $Z^* = Y^{-1}$ Numerical values of matrix elements $Z^* = Y^{-1}$

Номер столбца	Номер строки					
	1	2	3	4	5	6
1	$-0,108507$ $-j0,311646$	$-0,105388$ $-j0,31205$	$-0,104329$ $-j0,305067$	$-0,0993661$ $-j0,290416$	$-0,0862661$ $-j0,188109$	$-0,0984642$ $-j0,287283$
2	$-0,105388$ $-j0,31205$	$-0,106862$ $-j0,312466$	$-0,105774$ $-j0,305469$	$-0,100741$ $-j0,290799$	$-0,0872144$ $-j0,188273$	$-0,099825$ $-j0,287661$
3	$-0,104329$ $-j0,305067$	$-0,105774$ $-j0,305469$	$-0,109649$ $-j0,419988$	$-0,104446$ $-j0,399824$	$-0,0860769$ $-j0,183972$	$-0,103548$ $-j0,395528$
4	$-0,0993661$ $-j0,290416$	$-0,100741$ $-j0,290799$	$-0,104446$ $-j0,399824$	$-1,8514$ $-j1,67893$	$-0,08197$ $-j0,175134$	$-1,83264$ $-j1,66015$
5	$-0,0862661$ $-j0,188109$	$-0,0872144$ $-j0,188273$	$-0,0860769$ $-j0,183972$	$-0,0819727$ $-j0,175134$	$-0,08277$ $-j0,23663$	$-0,0811949$ $-j0,173233$
6	$-0,0984642$ $-j0,287283$	$-0,099825$ $-j0,287661$	$-0,103548$ $-j0,395528$	$-1,83264$ $-j1,66015$	$-0,081195$ $-j0,173233$	$-2,72467$ $-j2,31586$

ветви (генераторной, нагрузочной, ветви сети между двумя узлами), формируя поиск нужных параметров в массивах исходной информации и в матрице Y и $Z^* = Y^{-1}$.

Для схемы на рис. 3 численные значения элементов матриц Y и Z^* приведены в табл. 1 и табл. 2.

Процесс формирования расчетных выражений иллюстрируется примером.

Пример:

А. Расчет тока в генераторной ветви I5

$$\dot{I}_{I5} = \dot{I}_{I,15} + \dot{I}_{II,15} = \frac{\dot{U}_I}{Z_{I5,15}} + \frac{\dot{U}_{II}}{Z_{II,15}},$$

где $Z_{I5,15}$ — собственное сопротивление, определяющее величину тока, поставляемого генератором I в ветвь I5;

$Z_{II,15}$ — взаимное сопротивление между генераторной ветвью II и ветвью I5, т. е. определяющее величину тока $\dot{I}_{II,15}$.

Для расчета величины $Z_{I5,15}$ используется формула (2), т. е. в нашем случае

$$Z_{I5,15} = \frac{Z_{I5}^2}{Z_{I5} + Z_{55}^*},$$

а для расчета $Z_{II,15}$ служит формула (3)

$$Z_{II,15} = \frac{Z_{II} Z_{I5}}{Z_{I5}^*}.$$

Б. Расчет тока в нагрузочной ветви 3-го узла

$$\dot{I}_{30} = \dot{I}_{I,30} + \dot{I}_{II,30} = \frac{\dot{U}_I}{Z_{I5,30}} + \frac{\dot{U}_{II}}{Z_{II,30}},$$

где $Z_{I5,30}$ — взаимное сопротивление между генераторной ветвью I5 и нагрузочной ветвью 3-го узла;

$Z_{II,30}$ — взаимное сопротивление между генераторной ветвью II и нагрузочной ветвью 3-го узла.

Согласно формуле (3а) математические выражения для расчета этих сопротивлений будут иметь вид:

Результаты расчета узловых напряжений (В) итераций 1–4
Calculation results of iterations 1-4 nodal voltages (В)

Номер итерации	Напряжение				
	U_1	U_3	U_4	U_5	U_6
1	33761,15	9453,24	8999,71	105464,4	8904,24
2	34770,77	9900,27	9249,09	107107,7	9112,26
3	34961,26	9957,5	9332,98	107508,4	9201,05
4	34993,7	9967,28	9352,9	107573,2	9223,2

$$Z_{15;30} = \frac{Z_{15}Z_{30}}{Z_{53}^*};$$

$$Z_{III;30} = \frac{Z_{III}Z_{30}}{Z_{13}^*}.$$

В числители этих выражений вошли сопротивления из массива исходных данных, в знаменатели — элементы матрицы $Y^{-1} = Z^*$.

В. Расчет тока в ветви сети между узлами 3 и 4

$$\dot{I}_{34} = \dot{I}_{I;34} + \dot{I}_{II;34} = \frac{\dot{U}_I}{Z_{15;34}} + \frac{\dot{U}_{II}}{Z_{III;34}},$$

где $Z_{15;34}$ — взаимное сопротивление между генераторной ветвью I5 и ветвью сети 3–4;

$Z_{III;34}$ — взаимное сопротивление между генераторной ветвью II2 и ветвью сети 3–4.

Для расчета взаимных сопротивлений $Z_{15;34}$ и $Z_{III;34}$ используем формулу (4):

$$Z_{15;34} = \frac{Z_{15}Z_{34}}{Z_{54}^* - Z_{53}^*};$$

$$Z_{III;34} = \frac{Z_{III}Z_{34}}{Z_{14}^* - Z_{13}^*}.$$

Все необходимые для расчетов сопротивления извлекаются из массивов исходной информации и матриц Y и Z^* с помощью номеров узлов, в которые включены эти сопротивления.

Вычисленные токи ветвей и известные их сопротивления (см. рис. 3) позволяют рассчитать напряжения в узлах схемы (см. рис. 1, блок 5).

После завершения первого цикла расчета полученные напряжения сравниваются с теми напряжениями, которые были заданы в начале расчета и на основе которых были рассчитаны значения проводимостей нагрузок. Если различие напряжений в любом узле превышает допустимое значение, то управление переда-

ется блоку 2 (см. рис. 1), т. е. начинается повторный цикл расчета, в ходе которого заново рассчитываются проводимости, зависящие от напряжений.

Таким образом, напряжения в конце каждого цикла сопоставляются с напряжениями предыдущего цикла до тех пор, пока их различие не станет меньше заданного расчетчиком значения. Когда выполнится это условие, повторение цикла отменяется и уравнение передается блоку 7 (см. рис. 1) для определения всех остальных параметров режима системы электроснабжения, включающих в себя (помимо токов и напряжений) распределение потоков и потерь мощности и электроэнергии во всех элементах системы.

Для электрической сети на рис. 2 при заданном значении $\varepsilon = 1\%$ требуется три итерации (табл. 3) и менее 0,5 с времени, что также подтверждает эффективность предлагаемого метода, который представляет собой применение точного метода с коррекцией для определения неизвестных параметров нелинейной системы уравнений узловых напряжений.

Результаты расчета режима электрической сети (см. рис. 1, см. табл. 3), свидетельствуют о том, что напряжения узлов 4 и 6 примерно на 15% меньше номинальных значений, что требует проведения соответствующих технических мероприятий для их повышения до приемлемых значений.

Главное преимущество предлагаемого метода состоит в надежном и быстром получении результата. Недостатком его является необходимость определять и, главное, запоминать матрицу $Z^* = Y^{-1}$, в которой нет нулевых элементов (см. табл. 2).

Применение этого метода для расчетов режимов электрических систем с огромным количеством узлов невозможно без специальных методов эквивалентирования, так как требует использования ЭВМ с большой памятью. Но таковыми являются крупные электроэнергетические системы большой энергетики. Системы

электроснабжения предприятий лесного и агропромышленного комплексов характеризуются во много раз меньшими объемами узлов и ветвей. В связи с этим возможностей существующих ПЭВМ вполне достаточно для их расчета и анализа.

Выводы

Получены универсальные формулы расчета собственных и взаимных сопротивлений в электрических системах любой конфигурации, в связи с чем предлагаемый метод является точным методом с коррекцией. Коррекция необходима в каждом цикле расчета с целью учета нелинейности отдельных параметров электрической системы.

Предложенный метод обеспечивает быстрое и более надежное получение результатов расчета по сравнению с известными и распространенными в электроэнергетике итерационными методами с их нерешенной проблемой сходимости итерационного процесса счета.

Алгоритмы, реализующие метод, имеют несомненную перспективу использования в различных задачах анализа как установившихся, так и переходных процессов, что подтверждено практикой их применения для электрического расчета систем электроснабжения лесного и агропромышленного комплексов, а также режимных параметров государственных энергосистем и систем электроснабжения оборонных объектов страны.

Список литературы

- [1] Веников В.А., Зуев Э.Н., Строев В.А. Электрические системы. Электрические сети. М.: Высшая школа, 1998. 511 с.
- [2] Идельчик В.И. Электрические системы и сети. М.: Альянс, 2009. 592 с.
- [3] Илюшин П.В., Тыквинский А.М. Особенности обеспечения надежного электроснабжения промышленных потребителей в изолированных энергосистемах // Вестник Казанского государственного энергетического университета, 2019. Т. 11. № 1 (41). С. 39–50.
- [4] Аюев Б.И. Жуков А.В. Новые подходы к мониторингу запаса устойчивости электроэнергетических систем // Энергосистема: управление, конкуренция образование: Сб. докладов III Междунар. науч.-практ. конф., Екатеринбург, 13–16 октября 2008. В 2 т. Екатеринбург: Изд-во УГТИ–УПИ, 2008. Т. 1. 453 с.
- [5] Seyfullin A.Y., Vinogradov A.V., Dorokhov A.S., Vinogradova A.V. Selection and Justification of the Structure of the Basic Data of Monitoring Systems of Electrical Modes of the Rural Electrical Grids and the Principles of Their Processing // 2021 3rd Int. Conf. on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, 10–12 November 2021. Lipetsk, 2021. pp. 1195–1200. DOI:10.1109/SUMMA53307.2021.9632027
- [6] Dmitriev S.A., Khalyasmaa A.I., Semerikov A.S., “Functional state assessment of the power supply system based on system operation parameters”, Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2016, Saint Petersburg, 25–27 May 2016, Saint Petersburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2016, pp. 141–144.
- [7] Гурьев В.В., Кувшинов В.В., Якимович Б.А. Исследование установившихся режимов солнечной электростанции, работающей в распределительной сети электроэнергетической системы // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2022. Т. 25. № 1. С. 108–117.
- [8] Туфанов В.А., Федченко В.Г., Архипцев Ю.Ф. Применение вычислительных методов в энергетике. М.: Энергоатомиздат, 1983. 136 с.
- [9] Бесараб А.Н., Невольниченко В.Н., Шабовта М.Ю., Соколов Я.А., Тищенко И.И. Уменьшение технологических потерь электроэнергии в городских распределительных сетях напряжением 10 кВ путем оптимизации мест размыкания контуров // Электротехнические и компьютерные системы, 2016. № 21(97). С. 70–75.
- [10] Shu J., Quan S.S., Zhang L.Z. Optimal operation of distribution power system including distributed generator // International Conference on Power System Technology. Zhejiang: IEEE, 2010, pp. 1–6.
- [11] Гительман Л.Д., Добродей В.В., Кожевников М.В. Инструменты устойчивого развития региональной энергетики // Экономика региона, 2020. Т. 16. Вып. 4. С. 1208–1223.
- [12] Трубицин М.А., Микаэльян Е.Ю. К вопросу расчета установившихся режимов электроэнергетических систем // Инженерный вестник Дона, 2020. № 9(69). С. 49–55.
- [13] Бадалян Н.П. Моделирование и расчет установившихся режимов электрических сетей // Вестник научных конференций, 2020. № 2–3(54). С. 14–18.
- [14] Гуревич Ю.Е. Либова Л.Е. Применение математических моделей электрической нагрузки в расчетах устойчивости энергосистем и надежности электроснабжения промышленных потребителей. М.: Элекс-КМ, 2008. 248 с.
- [15] Арестова А.Ю., Лыкин А.В., Сидоркин Ю.М., Фролова Я.А. Электрические системы и сети. Установившиеся режимы электрических сетей. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2020. 98 с.
- [16] Акишин Л.А. Математические задачи электроэнергетики. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2010. 100 с.
- [17] Listopad S. Architecture of the hybrid intelligent multi-Agent system of heterogeneous thinking for planning of distribution grid restoration // Baltic J. of Modern Computing, 2019, v. 7, no. 4, pp. 487–499.
- [18] Rezaeva M.A. Semendyaev R.Y. Development and application of convolutional neural network for the recognition of objects in the scheme of electric grid // J. of Physics: Conf. Ser., Vladivostok, 07–08 October 2021. Vladivostok, 2021, pp. 012–020.

- [19] Медов Р.В. Развитие методов и программного обеспечения исследований несимметричных режимов электроэнергетических систем: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. Санкт-Петербург. С.-Петербург. гос. техн. ун-т, 2002, 18 с.
- [20] Семенюк Н.В. Влияние неоднородности электрической сети на оптимальность параметров электроэнергетического режима // Энергетические установки и технологии, 2020, Т. 6, № 4, С. 61–66.
- [21] Варганова А.В., Панова Е.А., Хатюшина Т.В., Кононенко В.С., Багаева Х.М. Разработка базы данных электрооборудования 35–220 кВ для САПР «ОРУ САД» // Электротехнические системы и комплексы, 2018, № 2(39), С. 28–30.
- [22] Васильев П.А. Совершенствование методов и алгоритмов расчета и анализа установившихся режимов электрических сетей энергосистем: дис. ... канд. техн. наук. Новочеркасск, 2006. 123 с.
- [23] Алтухова М.К. Повышение эффективности численного решения уравнений предельных установившихся режимов и идентификации чувствительных элементов в электроэнергетической системе // Известия НТЦ Единой энергетической системы, 2019, № 2(81), С. 77–83.
- [24] Крюков А.В. Предельные режимы электроэнергетических систем. Иркутск: Иркутский государственный университет путей сообщения, 2012. 236 с.
- [25] Marujo D., Zanatta G.L., Floréz H.A.R. Optimal management of electrical power systems for losses reduction in the presence of active distribution networks // Electrical Engineering (Archiv für Elektrotechnik), 2021, v. 103, no. 3, pp. 1725–1736.
- [26] Marković N.A., Bjelić S.N., Marković F.N. Diagnostics Algorithms for Analysis and Assessment of Steady States and Disorders in Electrical Networks // International J. of Image, Graphics and Signal Processing, 2022, v. 14, iss. 4, pp. 1–12.
- [27] Кольниченко Г.И., Тарлаков Я.В., Сиротов А.В., Усачев М.С. Основы электротехники и электроснабжения предприятий лесного комплекса. Основы электроснабжения. СПб.: Лань, 2022. 252 с.
- [28] Кольниченко Г.И. К прямому методу расчета режимов электрических систем с помощью ЦВМ // Известия вузов. Энергетика, 1973, № 2, С. 3–7.
- [29] Идельчик В.И. Пример анализа существования и единственности уравнений установившегося режима // Электричество, 1983, № 6, С. 56–59.
- [30] Тесленко Е.А., Екимова М.Ю. Математическое описание состояний изучаемых объектов и процессов измерений анализируемых физических систем // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023, Т. 27, № 6. DOI 10.18698/2542-1468-2023-6-178-188.
- [31] Идельчик В.И., Ярош В.А. Анализ результатов исследования существования и единственности решения уравнений установившегося режима // Advances in Science and Technology: сб. статей IX Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 31 июля 2017 года. М.: Актуальность. РФ, 2017. С. 79–80.
- [32] Сафарян В.С., Сафарян Л.В. Аналитическое исследование установившегося режима двухузловой сети // Вестник Национального политехнического университета Армении. Электротехника, энергетика, 2018, № 1, С. 64–72.
- [33] Кольниченко Г.И., Тарлаков Я.В. Сложнозамкнутые системы электроснабжения и расчет их электрических режимов // Электротехнологии и электрооборудование в АПК, 2022, Т. 69, № 4(49), С. 131–136.
- [34] Guryev V.V., Kuvshinov V.V., Yakimovich B.A. Investigation of Existence of Steady States of a Solar Power Plant Operating in the Distribution Network of an Electric Power System // Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova, 2022, v. 25, no. 2, pp. 89–96.
- [35] Соснина Е.Н., Кралин А.А., Асабин А.А., Крюков Е.В. Исследование установившихся режимов работы распределительной электрической сети с тиристорным регулятором напряжения // Промышленная энергетика, 2021, № 12, С. 2–15.
- [36] Marujo D., Zambroni De Souza A.C., Lopes B.I.L., Oliveira D.Q. Active Distribution Networks Implications on Transmission System Stability // J. of Control, Automation and Electrical Systems, 2019, v. 30, no. 3, pp. 380–390.

Сведения об авторах

Кольниченко Георгий Иванович [✉] — д-р техн. наук, профессор, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), g_kolnic@mail.ru

Тарлаков Яков Викторович — канд. техн. наук, доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), tarlakov@mgul.ac.ru

Усачев Максим Сергеевич — канд. техн. наук, доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), usachev@mgul.ac.ru

Поступила в редакцию 01.07.2024.

Одобрено после рецензирования 18.12.2024.

Принята к публикации 20.02.2025.

CONSTRUCTING ALGORITHM OF ELECTRICAL COMPUTATIONS FOR ELECTRICAL POWER SUPPLY OF FORESTRY ENTERPRISES

G.I. Kol'nichenko✉, Y.V. Tarlakov, M.S. Usachev

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

g_kolnic@mail.ru

Designing, operation and development of electrical power supply systems is impossible without multiple computations of its steady-state modes. Such computations give necessary information while identifying allowable and optimal operation modes of power supply systems as well as while checking its static and dynamic stability, analyzing its reliability. Nowadays computation of a complex electrical power system steady-state mode is reduced to solving systems of nonlinear equations by one of iterative methods. The drawback of such methods is that iteration convergence is often lowered or even uncovered. Due to this fact a new electrical computation method has been developed in Mytishchi branch of BMSTU which allows to get results by several repeated computation cycles necessary to consider nonlinearity of electrical power supply system elements (generators, loads etc). Within each cycle computation is made based on universal formulae obtained as a result of a direct computation method of intrinsic and mutual resistance. This method provides higher speed and reliability of getting results. A disadvantage of this method is the necessity to identify and remember inverse matrix elements of node voltage equation coefficients in which there are no null elements. However, while computing power supply systems of forest complex which has lower scale than electrical systems of large energetics this drawback can be considered insignificant. In authors' view the method given can be successfully used while researching time-independent and transient processes which is proved by using it in computing electrical power supply systems in various industries of our country.

Keywords: electrical power supply systems, electrical computation method, computation algorithm and program, direct and iterative methods

Suggested citation: Kol'nichenko G.I., Tarlakov Ya.V., Usachev M.S. *Algoritmizatsiya elektricheskikh raschetov sistem elektrosnabzheniya predpriyatiy lesnogo kompleksa* [Constructing algorithm of electrical computations for electrical power supply of forestry enterprises]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 2, pp. 135–146. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-2-135-146

References

- [1] Venikov V.A., Zuev E.N., Stroev V.A. *Elektricheskie sistemy* [Electrical systems]. Elektricheskie seti [Electrical networks]. Moscow: Al'yans [Higher School], 1998, 511 p.
- [2] Idel'chik V.I. *Elektricheskie sistemy i seti* [Electrical systems and networks]. Moscow: Alliance, 2009, 592 p.
- [3] Ilyushin P.V., Tykvinskiy A.M. *Osobennosti obespecheniya nadezhnogo elektrosnabzheniya promyshlennykh potrebitелей v izolirovannykh energosistemakh* [Features of ensuring reliable power supply to industrial consumers in isolated power systems]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Bulletin of Kazan State Power Engineering University], 2019, v. 11, no. 1 (41), pp. 39–50.
- [4] Ayuev B.I. Zhukov A.V. *Novye podkhody k monitoringu zapasa ustoychivosti elektroenergeticheskikh sistem* [New approaches to monitoring the stability margin of electric power systems]. *Energosistema: upravlenie, konkurentsia obrazovanie: sb. dokladov III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Power system: management, competition, education: collection of scientific papers. Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference], Ekaterinburg, October 13–16, 2008. In 2 volumes. Ekaterinburg: UGTI-UPI, 2008, v. 1, 453 p.
- [7] Gur'ev V.V., Kuvshinov V.V., Yakimovich B.A. *Issledovanie ustanovivshikhsya rezhimov solnechnoy elektrostantsii, rabotayushchey v raspredelitel'noy seti elektroenergeticheskoy sistemy* [Study of steady-state modes of a solar power plant operating in the distribution network of an electric power system]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova* [Bulletin of Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov], 2022, v. 25, no. 1, pp. 108–117.
- [8] Tufanov V.A., Fedchenko V.G., Arkhiptsev Yu.F. *Primenenie vychislitel'nykh metodov v energetike* [Application of computational methods in power engineering]. Moscow: Energoatomizdat, 1983, 136 p.
- [9] Besarab A.N., Nevol'nichenko V.N., Shabovta M.Yu., Sokolov Ya.A., Tishchenko I.I. *Umen'shenie tekhnologicheskikh poter' elektroenergii v gorodskikh raspredelitel'nykh setyakh napryazheniem 10 (6) kV putem optimizatsii mest razmykaniya konturov* [Reduction of technological losses of electric power in urban distribution networks with a voltage of 10 (6) kV by optimizing the places of circuit opening]. *Elektrotekhnicheskie i komp'yuternye sistemy* [Electrical and computer systems], 2016, no. 21 (97), pp. 70–75.
- [11] Gitel'man L.D., Dobrodey V.V., Kozhevnikov M.V. *Instrumenty ustoychivogo razvitiya regional'noy energetiki* [Instruments for sustainable development of regional energy]. *Ekonomika regiona* [Economy of the region], 2020, v. 16, iss. 4, pp. 1208–1223.
- [12] Trubitsin M.A., Mikael'yan E.Yu. *K voprosu rascheta ustanovivshikhsya rezhimov elektroenergeticheskikh sistem* [On the issue of calculating steady-state modes of electric power systems]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2020, no. 9 (69), pp. 49–55.

- [13] Badalyan N.P. *Modelirovanie i raschet ustanovivshikhsya rezhimov elektricheskikh setey* [Modeling and calculation of steady-state modes of electrical networks]. Vestnik nauchnykh konferentsiy [Bulletin of scientific conferences], 2020, no. 2–3(54), pp. 14–18.
- [14] Gurevich Yu.E., Libova L.E. *Primenenie matematicheskikh modeley elektricheskoy nagruzki v raschetakh ustoychivosti energosistem i nadezhnosti elektrosnabzheniya promyshlennykh potrebiteley* [Application of mathematical models of electrical load in calculating the stability of power systems and the reliability of power supply to industrial consumers]. Moscow: Eleks-KM, 2008, 248 p.
- [15] Arestova A.Yu., Lykin A.V., Sidorkin Yu.M., Frolova Ya.A. *Elektricheskie sistemy i seti. Ustanovivshiesya rezhimy elektricheskikh setey* [Electrical systems and networks. Steady-state modes of electrical networks]. Novosibirsk: Novosibirskiy gosudarstvennyy universitet [Novosibirsk State Technical University], 2020, 98 p.
- [16] Akishin L.A. *Matematicheskie zadachi elektroenergetiki* [Mathematical problems of electric power engineering]. Irkutsk: Publishing house of IrSTU, 2010, 100 p.
- [19] Medov R.V. *Razvitie metodov i programmnogo obespecheniya issledovaniy nesimmetrichnykh rezhimov elektroenergeticheskikh sistem* [Development of methods and software for studying asymmetric modes of electric power systems: author's abstract]. Diss. Cand. Sci. (Tech.) 05.14.02. St. Petersburg, St. Petersburg State Tech. University, 2002, 18 p.
- [20] Semenyuk N.V. *Vliyaniye neodnorodnosti elektricheskoy seti na optimal'nost' parametrov elektroenergeticheskogo rezhima* [Influence of electrical network heterogeneity on the optimality of electric power mode parameters]. Energeticheskie ustanovki i tekhnologii [Power Installations and Technologies], 2020, v. 6, no. 4, pp. 61–66.
- [21] Varganova A.V., Panova E.A., Khatyushina T.V., Kononenko V.S., Bagaeva Kh.M. *Razrabotka bazy dannykh elektrooborudovaniya 35–220 kV dlya SAPR «ORU CAD»* [Development of a 35–220 kV electrical equipment database for the ORU CAD system]. Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы [Electrical Engineering Systems and Complexes], 2018, no. 2(39), pp. 28–30.
- [22] Vasil'ev P.A. *Sovershenstvovanie metodov i algoritmov rascheta i analiza ustanovivshikhsya rezhimov elektricheskikh setey energosistem* [Improving the methods and algorithms for calculating and analyzing the steady-state modes of electrical networks of power systems]. Diss. Cand. Sci. (Tech.). Novocheerkassk, 2006, 123 p.
- [23] Altukhova M.K. *Povysheniye effektivnosti chislennogo resheniya uravneniy predel'nykh ustanovivshikhsya rezhimov i identifikatsii chuvstvitel'nykh elementov v elektroenergeticheskoy sisteme* [Improving the efficiency of numerical solutions of equations of limit steady-state modes and identification of sensitive elements in the electric power system]. Izvestiya NTTs Edinoy energeticheskoy sistemy [Bulletin of the Scientific and Technical Center of the Unified Energy System], 2019, no. 2(81), pp. 77–83.
- [24] Kryukov A.V. *Predel'nye rezhimy elektroenergeticheskikh sistem* [Limit modes of electric power systems]. Irkutsk: Irkutskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya [Irkutsk State University of Transport], 2012, 236 p.
- [27] Kol'nichenko G.I., Tarlakov Ya.V., Sirotoy A.V., Usachev M.S. *Osnovy elektrotekhniki i elektrosnabzheniya predpriyatiy lesnogo kompleksa. Osnovy elektrosnabzheniya* [Fundamentals of electrical engineering and power supply of forestry enterprises]. St. Petersburg: Lan', 2022, 252 p.
- [28] Kol'nichenko G.I. *K pryamomu metodu rascheta rezhimov elektricheskikh sistem s pomoshch'yu TsVM* [On a Direct Method for Calculating Electrical System Modes Using a Digital Computer]. Izvestiya vuzov. Energetika [News of Universities. Power Engineering], 1973, no. 2, pp. 3–7.
- [29] Idel'chik V.I. *Primer analiza sushchestvovaniya i edinstvennosti uravneniy ustanovivshegosya rezhima* [An Example of Analysis of the Existence and Uniqueness of Steady-State Equations]. Elektrichestvo [Electricity], 1983, no. 6, pp. 56–59.
- [30] Teslenko E.A., Ekimova M.Yu. *Matematicheskoye opisanie sostoyaniy izuchaemykh ob'ektov i protsessov izmereniy analiziruemyykh fizicheskikh sistem* [Mathematical description of studied objects states and measurement processes of analyzed physical systems]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2023, vol. 27, no. 6, pp. 178–188. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-178-188
- [31] Idel'chik V.I., Yarosh V.A. *Analiz rezul'tatov issledovaniya sushchestvovaniya i edinstvennosti resheniya uravneniy ustanovivshegosya rezhima* [Analysis of the Results of a Study of the Existence and Uniqueness of a Solution to Steady-State Equations]. Advances in Science and Technology: sb. statey IX mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Advances in Science and Technology: Collection of Articles from the IX International Scientific and Practical Conference], Moscow, July 31, 2017. Moscow: Aktualnost.RF, 2017, pp. 79–80.
- [32] Safaryan V.S., Safaryan L.V. *Analiticheskoye issledovanie ustanovivshegosya rezhima dvukhuzlovoy seti* [Analytical study of the steady-state mode of a two-node network]. Vestnik Natsional'nogo politekhnicheskogo universiteta Armenii. Elektrotekhnika, energetika [Bulletin of the National Polytechnic University of Armenia. Electrical engineering, power engineering], 2018, no. 1, pp. 64–72.
- [33] Kol'nichenko G.I., Tarlakov Ya.V. *Slozhnozamknutyie sistemy elektrosnabzheniya i raschet ikh elektricheskikh rezhimov* [Complex closed-loop power supply systems and calculation of their electrical modes]. Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK [Electrical technologies and electrical equipment in the agro-industrial complex], 2022, v. 69, no. 4(49), pp. 131–136.
- [34] Guryev V.V., Kuvshinov V.V., Yakimovich B.A. *Investigation of Existence of Steady States of a Solar Power Plant Operating in the Distribution Network of an Electric Power System*. Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova, 2022, v. 25, no. 2, pp. 89–96.
- [35] Sosnina E.N., Kralin A.A., Asabin A.A., Kryukov E.V. *Issledovanie ustanovivshikhsya rezhimov raboty raspredelitel'noy elektricheskoy seti s tiristornym regulyatorom napryazheniya* [Study of steady-state operating modes of a distribution electric network with a thyristor voltage regulator]. Promyshlennaya energetika [Industrial power engineering], 2021, no. 12, pp. 2–15.
- [36] Marujo D., Zambroni De Souza A.C., Lopes B.I.L., Oliveira D.Q. *Active Distribution Networks Implications on Transmission System Stability*. J. of Control, Automation and Electrical Systems, 2019, v. 30, no. 3, pp. 380–390.

Authors' information

Kol'nichenko Georgiy Ivanovich ✉ — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch),
g_kolnic@mail.ru

Tarlakov Yakov Viktorovich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi
branch), tarlakov@mgul.ac.ru

Usachev Maksim Sergeevich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi
branch), usachev@mgul.ac.ru

Received 01.07.2024.

Approved after review 18.12.2024.

Accepted for publication 20.02.2025.

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

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЛОСКОГО ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ БУМАЖНО-ПОЛИМЕРНЫХ ПЛИТ

А.Ю. Гранкин¹✉, В.В. Никитин¹, И.Д. Сидельников²

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5

grankin@bmstu.ru

Рассмотрена динамика изменений внутренних напряжений в композиционных материалах в процессе плоского горячего прессования. Описаны ключевые факторы, влияющие на прочностные характеристики пресскомпозиции, в частности температура, влажность, давление парогазовой смеси и степень отверждения связующего. Приведен подробный анализ послойного формирования брикета, с учетом для каждого слоя упругого сопротивления, давления парогазовой смеси и степени отверждения связующего. Установлено, что предел прочности при растяжении перпендикулярно пласти является функцией температуры, влагосодержания, плотности и степени отверждения связующего, а также зависит от координат слоя и времени. Охарактеризовано влияние давления прессования на процесс плоского горячего прессования, включая риски, связанные с превышением допустимого давления парогазовой смеси, что может привести к износу дистанционных прокладок и ухудшению условий выхода образовавшейся парогазовой смеси образующийся в процессе плоского горячего прессования. Выявлена зависимость на времени прессования в зависимости от исходной влажности брикета. Предложена математическая модель процессов, протекающих при горячем прессовании композиционных материалов, с конкретными краевыми условиями. Представлено понимание процессов тепло- и массопереноса в капиллярно-пористых материалах при плоском горячем прессовании и их влияния на механические и теплофизические свойства готового материала, что важно для улучшения качества изделий из него. Рекомендуется использование данной математической модели для получения материалов с заранее заданными свойствами при различных начальных и краевых условиях.

Ключевые слова: математическая модель, модель тепломассопереноса, реологическая модель, бумажные отходы, терморезактивное связующее, композиционные материалы, плоское прессование

Ссылка для цитирования: Гранкин А.Ю., Никитин В.В., Сидельников И.Д. Математическая модель плоского горячего прессования бумажно-полимерных плит // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 2. С. 147–158. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-2-147-158

Процесс изготовления композиционных материалов с использованием метода плоского горячего прессования широко распространен в настоящее время. При этом именно горячее прессование является основным этапом, на котором закладывается большинство свойств композиционного материала. В зависимости от типа создаваемых композиционных материалов технология их изготовления может существенно различаться. Поэтому важно разобраться в процессах, происходящих во время прессования.

Среди ключевых процессов, протекающих при прессовании, можно выделить тепломассоперенос, отверждение связующего, деформацию и формирование послойной плотности материала. Эти процессы зависят от множества факторов, включая тип и фракционный состав компонентов, плотность и влажность пресскомпозиции, а также температуру и давление во

время прессования. Все эти параметры влияют на распределение внутренних напряжений в готовом материале.

Для адекватного описания указанных процессов и проведения расчетов, направленных на оптимизацию технологии, необходимо разработать математическую модель прессования, учитывающую все основные физические явления, происходящие в процессе плоского горячего прессования. Также важно создать замыкающие соотношения и при необходимости определить зависимости и коэффициенты через экспериментальные исследования.

В настоящее время наиболее распространены композиционные материалы на терморезактивных связующих, и формирование таких материалов проходит при высоких температуре и давлении, изменяющихся в достаточно широком диапазоне в процессе горячего прессования, что связано со сложными физико-химическими процессами. Неоднородности

температуры и давления, возникающие вследствие нестационарных процессов тепло- и массопереноса, влияют на скорость формирования структуры материала. Для композитов на термопластах формирование также осуществляется при повышенном давлении и температуре, однако в данном случае обычно отсутствуют химические реакции.

При производстве композиционных материалов из бумаги на основе термопластичного связующего процесс прессования включает стадии горячего и холодного прессования. Значительное влияние на продолжительность прессования оказывает начальная влажность пресскомпозиции, поскольку температура плавления термопластов (таких как полиэтилен и полипропилен) значительно выше, чем температура, необходимая для прессования композиционных материалов на терморезистивных связующих [1]. Эти аспекты, а также другие вопросы, связанные с технологией производства композиционных материалов из бумажных отходов с использованием термопластичного связующего, накладывают определенные ограничения на технологический процесс и требуют дополнительного изучения.

Целью холодного прессования при прессовании на термопластичном связующем является окончательное закрепление полученной при горячем прессовании формы и размеров готового изделия. Для этого полученная плита охлаждается до температуры в центре ниже 50 °С для того, чтобы придать ей необходимую формоустойчивость и дать возможность проведения с ней дальнейших операций (снятие с поддона, перекладка и т. п.).

Цель работы

Цель работы — разработка математической модели плоского горячего прессования бумажно-полимерных плит при разных краевых условиях.

Материалы и методы

Процесс плоского горячего прессования является основной стадией процесса изготовления композиционных материалов, при котором происходит непрерывное изменение температуры и влажности брикета, давления парогазовой смеси и упругих напряжений внутри него, а также степени отверждения связующего и формирование профиля плотности, что, в конечном счете, и формирует свойства композиционного

материала на выходе из него. При исследовании процесса горячего прессования использовались математические методы описания протекающих при этом процессов, что позволило разработать математическую модель процесса прессования, а также экспериментальные методы определения необходимых замыкающих соотношений для использования данной модели на практике.

В качестве наполнителя использовалась макулатура офисная, прошедшая шреддирование, и измельченные отходы полипропилена.

Изучим, как изменяются напряжение внутри композиционного материала в процессе прессования.

Если рассматривать послойное формирование брикета пресскомпозиции, то при расчете напряжения внутри материала $\sigma_{\text{вн}}(x, \tau)$ для каждого слоя в произвольный момент времени необходимо учитывать упругое сопротивление брикета $\sigma_y(\tau)$, действующее в скелете пресскомпозиции, давление парогазовой смеси $p_{\text{пр}}(x, \tau)$, действующее в порах, и прочность склеивания (предел прочности при растяжении перпендикулярно пласти) $\sigma_p(x, \tau)$ в этом слое [2]

$$\sigma_{\text{вн}}(x, \tau) = \sigma_y(\tau)(1 - \Pi(x)) + p_{\text{пр}}(x, \tau)\Pi(x) - \sigma_p(x, \tau).$$

Предел прочности при растяжении перпендикулярно пласти в соответствующем слое брикета $\sigma_p(x)$ является функцией температуры $T(x)$, влагосодержания $W(x)$, плотности $\rho(x)$ брикета и степени отверждения связующего $\theta(x)$ и формируется в соответствии с их изменением в процессе прессования. В свою очередь, эти показатели взаимосвязаны между собой и зависят как от координат слоя, так и от времени τ

$$\sigma_p(x, \tau) = \sigma_p [T(x, \tau); W(x, \tau); \theta(x, \tau); \rho(x, \tau)].$$

Наиболее слабый слой по толщине брикета пресскомпозиции в любой момент времени соответствует слою, для которого

$$\left\{ \sigma_p(x, \tau) - \sigma_y(\tau)(1 - \Pi(x)) - p_{\text{пр}}(x, \tau)\Pi(x) \right\}_{\min}.$$

Смещение этого слоя по толщине брикета во времени совпадает с продвижением области интенсивного испарения влаги, в которой давление парогазовой смеси максимально для данного момента времени.

Для определения минимально допустимого давления прессования $P_{\text{пр}}^{\min}$ необходимо пользоваться минимально необходимой нагрузкой в наиболее слабом слое брикета

$$P_{\text{пр}}^{\text{min}}(\tau) = \left\{ \sigma_p(x, \tau) - \sigma_y(\tau)(1 - \Pi(x)) - p_{\text{пр}}(x, \tau)\Pi(x) \right\}_{\text{max}}.$$

Слишком высокое давление прессования, превышающее минимально допустимое, может привести к быстрому износу дистанционных прокладок, поскольку на них ложится основная нагрузка. Это также вызывает прогиб плит пресса во время прессования, что ухудшает условия выхода парогазовой смеси в центральной части брикета. В результате может произойти чрезмерный рост давления парогазовой смеси и, как следствие, расслоение брикета при размыкании плит пресса. В связи с этим давление прессования должно на протяжении всего процесса оставаться равным или немного превышать минимально допустимое, во избежание ненужной распрессовки брикета. В начале процесса допускается значительное превышение давления, что способствует быстрому прогреву брикета. Однако после прогрева превышение давления должно стать минимальным в целях облегчения выхода парогазовой смеси.

Завершение процесса прессования определяется моментом, когда прочность клеевого шва становится равной или превышает напряжения внутри брикета, вызванные упругим сопротивлением и давлением парогазовой смеси в самом слабом сечении

$$\left\{ \sigma_p(x, \tau) \geq \sigma_y(\tau)(1 - \Pi(x)) - p_{\text{пр}}(x, \tau)\Pi(x) \right\}_{\text{min}}.$$

Прерывание процесса раньше этого времени может привести к распрессовке или расслоению композиционного материала при раскрытии плит пресса.

Таким образом, для описания динамики изменения прочностных свойств композиционных материалов в процессе их прессования важно знать следующее:

- закон нагружения (диаграмму прессования) $\sigma(\tau)$, температуру прессования $T_n(\tau)$, начальные и граничные условия;

- поля давления парогазовой смеси $p(x, \tau)$, температуры $T(x, \tau)$, влагосодержания $W(x, \tau)$ и степени отверждения связующего $\theta(x, \tau)$ в брикете;

- распределение плотности $\rho(x, \tau)$, а следовательно, и пористости $\Pi(x, \tau)$ в брикете.

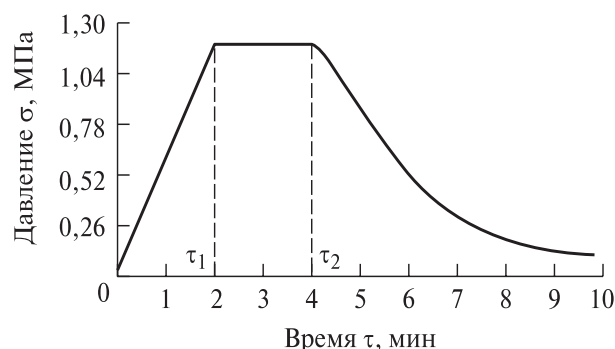
При моделировании процесса прессования композитных материалов следует учитывать протекающие при прессовании процессы:

- процесс нагружения — формирование диаграммы прессования $\sigma(\tau)$ с учетом протекания процессов;

- процесс теплопереноса — изменение давления парогазовой смеси $p(x, \tau)$, температуры $T(x, \tau)$, влагосодержания $W(x, \tau)$, теплофизических и фильтрационных характеристик;

- процесс реологии — формирование полойной плотности $\rho(x, \tau)$, а значит, и пористости $\Pi(x, \tau)$;

- процесс отверждения связующего и расчет прочностных показателей — изменение степени отверждения связующего $\theta(x, \tau)$, прочностных характеристик.



Пример диаграммы прессования: τ_1 — время смыкания плит пресса; $\tau_2 - \tau_1$ — время выдержки, под постоянным давлением; σ — давление; τ — продолжительность прессования

Example of pressing diagram: τ_1 — clamping time of press plates; $\tau_2 - \tau_1$ — curing time, under constant pressure; σ — pressure; τ — duration of pressing

Зададим некоторый эмпирический закон нагружения (рисунок), подлежащий уточнению на последующих шагах моделирования [3].

Диаграмму прессования (см. рисунок) можно описать математически

$$\sigma(\tau) = \begin{cases} a\tau, & \text{при } \tau \leq \tau_1; \\ a\tau_1, & \text{при } \tau_1 < \tau \leq \tau_2; \\ \sigma_0 e^{-(t/c)^k} + \sigma_\infty, & \text{при } \tau_1 > \tau > \tau_2, \end{cases}$$

где σ_∞ — равновесное напряжение в брикете после окончания процесса релаксации, МПа;

a, σ_0, k, c — коэффициенты, определяемые технологией прессования, которые могут быть приняты за компоненты вектора управляющих параметров [3].

Поскольку горячее прессование является высокотемпературным процессом (процессом теплопереноса), естественно предположить, что перенос влаги в брикете осуществляется в основном парогазовой смесью и термодиффузией влаги [3–11].

При нагревании брикета во время перехода температуры через точку кипения будет происходить фазовое превращение влаги. Температура на поверхности фазового перехода сохранится постоянной.

На основе закона сохранения массы вещества локальная производная объемной концентрации парогазовой смеси по времени равна сумме дивергенции потока этой смеси, а также источников и стоков парогазовой смеси.

Этот закон позволяет записать уравнение неразрывности для парогазового потока

$$\Pi(x, \tau) \frac{\partial \rho_{\text{пр}}}{\partial \tau} = - \sum_{i=1}^3 \frac{\partial q_{n_i}(x, \tau)}{\partial x_i} + I_{\text{ф.п}}(x, \tau) + I_{\text{конд}}(x, \tau),$$

где $\partial q_{n_i}(x, \tau) = -K_i \frac{\partial p_{\text{пр}_i}(x, \tau)}{\partial x_i}$, $i = 1, 2, 3$.

Здесь K_i — коэффициенты проницаемости брикета вдоль соответствующих координат;

$p_{\text{пр}}(x, \tau)$ — парогазовое давление в брикете, Па;

$I_{\text{ф.п}}(x, \tau)$ — источник пара, обусловленный фазовым переходом кипения;

$I_{\text{конд}}(x, \tau)$ — сток пара, обусловленный конденсацией.

Основным источником парогазовой смеси является испаряющаяся влага, масса которой будет пропорциональна давлению насыщенного пара $p_{\text{п.н}}$. Кроме того, испарение относится к числу фазовых переходов первого рода, протекающих при постоянной температуре. Следовательно, концентрация генерируемого пара связана однозначно с температурой кипения по уравнению кривой насыщения

$$I_{\text{ф.п}} = I_{\text{ф.п}}(x, T_{\text{ф.п}}).$$

Конденсация пара (сток) возможна лишь в тех точках брикета, где температура будет равна точке росы для данного парциального давления пара и данного влагосодержания парогазовой смеси.

Изменение влагосодержания плиты за счет переноса влаги в виде жидкой фазы, учитывающее термодиффузию, запишем как

$$\rho_0 \frac{\partial W_{\text{в}}}{\partial \tau} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left(a_m \rho_0 \delta \frac{\partial T}{\partial x_i} \right), i = 1, 2, 3,$$

где a_m — коэффициент влагопроводности;

δ — термоградиентный коэффициент.

Результатирующее изменение влагосодержания в брикете при прессовании можно определить из выражения

$$\rho_0 \frac{\partial W}{\partial \tau} = \rho_0 \frac{\partial W_{\text{в}}}{\partial \tau} + \Pi(x, \tau) \frac{\partial \rho_{\text{пр}}}{\partial \tau} + I_{\text{ф.п}}(x, \tau) + I_{\text{конд}}(x, \tau).$$

Дифференциальное уравнение переноса тепловой энергии имеет вид

$$c(W, T) \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_i(W, T) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \sum_{i=1}^3 c_{\text{пр}} \left(K_i \frac{\partial p_{\text{пр}}}{\partial x_i} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} + \Delta H \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + \Delta H_{\text{ф}} \frac{\partial W}{\partial \tau}, \quad (1)$$

где $c(W, T)$ — удельная теплоемкость брикета, Дж/кг·К;

ρ — плотность брикета, кг/м³;

λ_i — теплопроводность брикета по координате x_i , Вт/м·К;

$c_{\text{пр}}$ — удельная теплоемкость парогазовой смеси, Дж/кг·К;

ΔH — тепловой эффект химической реакции отверждения;

Θ — степень отверждения связующего;

$\Delta H_{\text{ф}}$ — тепловой эффект фазового перехода.

В уравнении (1) выражение

$$\left(\lambda_i(W, T) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right)$$

определяет перенос энергии теплопроводностью по координате x_i , а выражение

$$c_{\text{пр}} \left(K_i \frac{\partial p_{\text{пр}}}{\partial x_i} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i}$$

характеризует конвективный перенос энергии парогазовой смесью по координате x_i .

Источники энергии определяются фазовыми переходами и химической реакцией отверждения связующего. При движении поверхности фазового перехода происходит выделение (поглощение) скрытой теплоты кипения (конденсации).

Сформулируем дополнительные условия, которые должны выполняться на поверхности кипения (конденсации).

Пусть поверхностью раздела фаз является функция $\xi(\tau)$. За время $\Delta\tau$ граница фазового перехода ξ переместится от точки $\xi = x^*$ до точки $\xi = x^* + \Delta\xi$. При этом испаряется либо конденсируется масса $\rho_{\text{в}} \Delta\xi$ (где $\rho_{\text{в}}$ — плотность испаряющейся (конденсирующейся) жидкости) и поглощается либо выделяется соответствующее количество теплоты $r \Delta\xi$ (где r — скрытая теплота фазового перехода).

На основе теплового баланса для точек границы фазового перехода x^* и $x^* + \Delta\xi$ должно выполняться условие

$$\left[\lambda_1(W, T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x^*} - \lambda_2(W, T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x^* + \Delta \xi} \right] \Delta \tau = r \rho_b \Delta \xi, \quad \Pi(x) = 1 - \frac{\rho_0(x)[1 + \varepsilon(x)]}{\rho_{д.в.}}, \quad (2)$$

Здесь λ_1 и λ_2 — коэффициенты теплопроводности первой и второй фаз.

Переходя к пределу при $\Delta \tau = 0$, получаем дополнительное условие на границе раздела фаз

$$\lambda_1(W, T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\xi=0} - \lambda_2(W, T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\xi+\Delta \xi} = r \rho_b \frac{d\xi}{d\tau}.$$

На этой границе температура постоянна и равна температуре фазового перехода $T(x, \tau) = T_\phi$. Тепловые потоки разрывны и их разность равна $r \rho_b d\xi / d\tau$, где величина $d\xi / d\tau$ представляет собой скорость движения фронта границы фазового перехода. В каждой из фаз температура $T(x, \tau)$ должна удовлетворять уравнению теплопроводности (1).

Кроме того, в состав модели должны войти следующие уравнения:

– давления насыщенного пара

$$p_{п.н.}(T) = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + a_4 T^4,$$

где a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 , — известные аппроксимационные коэффициенты;

– состояния парогазовой смеси

$$\rho_{пг}(T) = \frac{p_{пг}}{R_{пг} T},$$

где $R_{пг}$ — универсальная газовая постоянная для парогазовой смеси;

– степени отверждения связующего

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = (1 - \theta) f(T_{см}, c_c),$$

где θ — степень отверждения связующего;

$f(T_{см}, c_c)$ — функция, задающая скорость отверждения в зависимости от температуры $T_{см}$ и концентрации связующего c_c ;

– изменения концентрации связующего

$$\frac{\partial c_c}{\partial \tau} = \begin{cases} \frac{-c_c^2 \rho_b}{\rho_{см} \bar{m} (1 - \Pi(x))} \cdot \frac{\partial W}{\partial \tau}, & \text{если } \frac{\partial W}{\partial \tau} < 0 \\ 0, & \text{если } \frac{\partial W}{\partial \tau} \geq 0 \end{cases},$$

где \bar{m} — отношение массы связующего в абсолютно сухом состоянии к исходной массе абсолютно сухой стружки;

$\rho_{см}$ — плотность связующего, кг/м³.

Пористость брикета пресскомпозиции в слое x определяется по выражению

где $\rho_0(x)$ — начальная плотность брикета в слое x , кг/м³;

$\rho_{д.в.}$ — плотность древесного вещества, кг/м³;

$\varepsilon(x)$ — деформация брикета в слое x .

Бумага и материалы на ее основе не обладают свойством линейности реологического характера и поэтому для них не выполняется принцип суперпозиции напряжений вследствие необратимого изменения внутренней структуры материала в процессе деформирования.

В любой момент времени деформация является суммой упругой $\varepsilon_{упр}(x)$, вязкоэластической (вязкой, вязкоупругой, упругозапаздывающей) $\varepsilon_{вз}(x)$, и остаточной (пластической) $\varepsilon_{ост}(x)$ составляющих, т. е.

$$\varepsilon(x) = \varepsilon_{упр}(x) + \varepsilon_{вз}(x) + \varepsilon_{ост}(x).$$

При длительном воздействии постоянной нагрузки упругая деформация со временем уменьшается. Предполагается, что длительный модуль упругости увеличивается с ростом остаточной деформации, что указывает на упрочнение материала. При снятии нагрузки упругая часть деформации восстанавливается мгновенно, а вязкоэластическая часть возвращается в течение бесконечного времени.

Дальнейший рост остаточной деформации не происходит, т. е. при $\sigma(\tau) = 0$

$$\frac{\partial \varepsilon(x)}{\partial \tau} = 0. \quad (3)$$

Остаточная деформация имеет ограниченный рост, определяемый в основном фракционным составом, температурой, влажностью и количеством связующего в брикете, т. е.

$$\varepsilon_{ост}(x) = \xi \varepsilon(x), \quad (4)$$

где ξ — некоторый коэффициент, зависящий от перечисленных свойств.

Таким образом, количественная характеристика реологических свойств композиционных материалов может быть получена из решения следующей системы уравнений:

$$\varepsilon(x) = \frac{1}{H} \sigma(\tau) + \varepsilon_{вз}(x) + \varepsilon_{ост}(x); \quad (5)$$

$$H = H_0 + \gamma \varepsilon_{ост}(x); \quad (6)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_{вз}(x)}{\partial \tau} = \begin{cases} K_1 \sigma(\tau) - \mu \varepsilon_{вз}, & \text{при } \varepsilon_{вз} < \frac{K_1 \sigma(\tau)}{\mu} \\ 0, & \text{при } \varepsilon_{вз} = \frac{K_1 \sigma(\tau)}{\mu} \end{cases};$$

$$\frac{\partial \varepsilon_{\text{ост}}(x)}{\partial \tau} = \begin{cases} K_2 \sigma(\tau) [\xi \varepsilon(x) - \varepsilon_{\text{ост}}(x)], & \text{при } \varepsilon_{\text{ост}}(x) < \xi \varepsilon(x) \\ 0, & \text{при } \varepsilon_{\text{ост}}(x) = \xi \varepsilon(x), \end{cases} \quad (8)$$

где $H_0, K_1, K_2, \mu, \xi, \gamma$ — коэффициенты, значения которых являются решениями обратной задачи параметрической идентификации, получаемыми на основе экспериментальных данных.

При конкретных начальных условиях система уравнений (5) — (8) может быть решена, если заданы законы деформирования ($\varepsilon(x, \tau) = \varepsilon(\tau)$) или нагружения $\sigma(\tau)$.

Существенным моментом в реологии композиционного материала является и то, что толщина H и деформация ε древесины существенно зависят от температуры и влажности:

$$H(x) = H_0 + \gamma \varepsilon_{\text{ост}}(x) + AW + BT + CWT, \quad (9)$$

$$\varepsilon(x) = \frac{1}{H} \sigma(\tau) + \varepsilon_{\text{вс}}(x) + \varepsilon_{\text{ост}}(x) + \alpha W + \beta T + \delta WT, \quad (10)$$

где $W = W(x, \tau)$ — влагосодержание материала; $T = T(x, \tau)$ — температура брикета; $A, B, C, \alpha, \beta, \delta$ — коэффициенты, полученные в результате обработки экспериментальных данных усушки и разбухания.

Таким образом, в результате решения системы уравнений (2), (3) — (10) можно определить пористость композиционного материала в каждой точке прессуемой плиты для любого момента времени.

Для термореактивных связующих скорость химической реакции отверждения зависит от температуры и концентрации реакционноспособных групп в олигомере и описывается уравнением

$$-\frac{dC}{dt} = k(T)C^n,$$

а степень отверждения связующего — выражением

$$\theta = \frac{C - C_0}{C_0},$$

где C_0 и C — соответственно начальная и текущая концентрации реакционноспособных групп, кг/кг.

Учитывая, что вследствие стерических затруднений степень отверждения не достигает единицы, а стремится к некоторому конечному значению θ_k , уравнение кинетики процесса отверждения записывается в виде

$$\frac{d\theta}{dt} = (\theta_k - \theta)^n k(T)C_0^{n-1}.$$

Температурная зависимость скорости процесса отверждения для термореактивных смол описывается уравнением Аррениуса

$$k(T) = k_0 \exp\left(-\frac{U}{RT}\right),$$

где k_0 — константа скорости реакции, 1/с.

Подставляя выражение (6) в (5), получаем окончательное уравнение кинетики образования полимерной матрицы

$$\frac{d\theta}{dt} = (\theta_k - \theta)^n k_0 C_0^{n-1} \exp\left(-\frac{U}{RT}\right). \quad (11)$$

В уравнении (11) параметры n, k_0, U подлежат экспериментальному определению для каждого типа полимерной матрицы.

Обычно реакции поликонденсации сопровождаются выделением (поглощением) теплоты. Тепловой эффект реакции, обусловленный перераспределением химических связей и изменением межмолекулярных взаимодействий, также может служить показателем степени отверждения реактопластов. Конечная степень отверждения в этом случае определяется из уравнения

$$\theta_k = Q_{\text{отв}} \frac{M}{(\pm \Delta H C_0)},$$

где M — молярная масса реагирующих веществ, кг/моль.

В работе [12] для практических расчетов рекомендуется использовать уравнение кинетики образования полимерной матрицы в виде

$$\frac{d\theta}{dt} = (1 - \theta)^n k_0^* \exp\left(-\frac{U}{RT}\right).$$

Объемный источник энергии, обусловленный тепловым эффектом реакции отверждения, можно описать уравнением

$$I_{VT} = \frac{\pm \Delta H}{M} a_{2m} \rho \frac{\partial \theta}{\partial t}, \quad (12)$$

где ρ — плотность реагирующих веществ, кг/м³, a_{2m} — массовая доля полимерной матрицы в композиционном материале, кг/кг.

В процессе реакции поликонденсации реактопластов на основе фенолоформальдегидных смол (КФ-МТ, ЛБС-4, ФФС и др.) выделяются вода, этиловый спирт и другие соединения. Для описания объемного источника продуктов

поликонденсации можно использовать уравнение [2]

$$I_{v_m} = \frac{J_m}{M} a_{2m} \rho \frac{\partial \theta}{\partial t},$$

где J_m — количество воды, выделившейся в результате образования полимерной матрицы, кг/моль.

Экспериментальные исследования показали [15], что при отверждении связующего на примере ЛБС-4 выделилось следующее количество продуктов: воды — 0,09...0,1 кг/кг смолы; этилового спирта — 0,008...0,04 кг/кг смолы. Эти продукты возникают в результате химической реакции поликонденсации, для поддержания которой требуется определенная энергия, учитываемая в уравнении кинетики образования полимерной матрицы. Выделяющиеся продукты поликонденсации при образовании полимерной матрицы и летучие компоненты частично накапливаются в порах, а частично адсорбируются. В дальнейшем эти продукты могут выделяться из готового материала в результате диффузионных процессов.

Плотность воздуха в 3 раза меньше плотности прессуемого брикета, поэтому влияние массопереноса при фильтрации воздуха на температуру брикета в процессе прессования можно не учитывать.

В связи с этим в уравнении переноса энергии должен учитываться лишь объемный источник энергии, обусловленный тепловым эффектом реакции образования полимерной матрицы (12). Тогда уравнение переноса энергии может быть записано в виде

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} a \left(\lambda_0 \frac{\partial T}{\partial x} \right) \pm I_{vT}. \quad (13)$$

Для термореактивных связующих степень отверждения θ характеризуется температурой стеклования $T_{ст}$ и зависит от температуры соответствующего слоя брикета $T(x)$.

С учетом изложенного выше систему уравнений теплообмена, описывающую процесс горячего прессования бумажно-полимерных плит на связующем, можно записать в виде:

– уравнение фильтрационного переноса парогазовой смеси

$$(\rho_n + \rho_r)v = -K \frac{\partial}{\partial x} (p_n + p_r);$$

$$\frac{\partial W_{\phi_2}}{\partial \tau} = \begin{cases} \beta_1 [p_{п.н}(T_{ck}) - p_n], & p_n \geq p_{п.н}(T_{ck}) \\ -\beta_2 [p_{п.н}(T_{ck}) - p_r] \chi(W), & p_{п.н}(T_{ck}) - p_r < p_n < p_{п.н}(T_{ck}); \\ -\left\{ \beta_2 [p_{п.н}(T_{ck}) - p_n - p_r]^2 + \beta_2 p_r \right\} \chi(W), & p_n < p_{п.н}(T_{ck}) - p_r \end{cases}$$

– уравнение неразрывности для водяного пара

$$\begin{aligned} \Pi \frac{\partial p_n}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_n v - D_n \frac{\partial \rho_n}{\partial x} \right) + \rho_b \frac{\partial W}{\partial \tau} = \\ = M_n \bar{M} \rho_{ck} (1 - \Pi) \frac{\partial \theta}{\partial \tau}. \end{aligned} \quad (14)$$

Методы определения параметров, входящих в уравнения (13) и (14) подробно изложены в работе [14]:

– уравнение неразрывности для неконденсирующихся газов

$$\begin{aligned} \Pi \frac{\partial p_r}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_r v - D_r \frac{\partial \rho_r}{\partial x} \right) = \\ = M_r \bar{M} \rho_{ck} (1 - \Pi) \frac{\partial \theta}{\partial \tau}; \end{aligned}$$

– уравнение переноса влаги в жидкой фазе

$$\rho_b v_b = -K_b W \frac{\partial}{\partial x} (p_n + p_r) - D_b \frac{\partial W}{\partial x};$$

– уравнение переноса энергии жидкой и твердой фазами

$$\begin{aligned} \left[c_{ck} \rho_{ck} (1 - \Pi) + c_b \rho_b W + c_r \bar{M} \rho_{ck} (1 - \Pi) \right] \frac{\partial T_{ck}}{\partial \tau} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_{ck} (T_{ck}, W, \Pi) \frac{\partial T_{ck}}{\partial x} \right] + c_b \rho_b v_b \frac{\partial T_{ck}}{\partial x} + \\ + \alpha_v (T - T_{ck}) + \rho_b E_{\phi} \frac{\partial W_{\phi_2}}{\partial \tau} + E_r \bar{M} \rho_{ck} (1 - \Pi) \frac{\partial \theta}{\partial \tau}; \end{aligned}$$

– уравнение переноса энергии парогазовой смеси

$$\begin{aligned} \Pi (c_n \rho_n + c_r \rho_r) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + r \rho_b \frac{\partial W_{\phi_1}}{\partial \tau} + \\ + v (c_n \rho_n + c_r \rho_r) \frac{\partial T}{\partial x} + \alpha_v (T_{ck} - T); \end{aligned}$$

– уравнение фазовых переходов

$$\frac{\partial W_{\phi}}{\partial \tau} = \frac{\partial W_{\phi_1}}{\partial \tau} + \frac{\partial W_{\phi_2}}{\partial \tau},$$

где

$$\frac{\partial W_{\phi_1}}{\partial \tau} = \begin{cases} \beta_1 [p_{п.н}(T) - p_n]^2, & p_n > p_{п.н}(T); \\ 0, & p_n \leq p_{п.н}(T); \end{cases}$$

$$\chi(W) = \arctg\left(\frac{W}{W_\varepsilon}\right);$$

– уравнение изменения влажности

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{\partial(Wv_v)}{\partial x} + \frac{\partial W_\phi}{\partial \tau};$$

– уравнение отверждения связующего

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \begin{cases} 1, & T < T_{cm} \\ 0, & T \geq T_{cm} \end{cases};$$

– уравнения состояния

$$\rho_n = \frac{P_n}{R(p_n)T};$$

$$\rho_r = \frac{P_r}{R(p_r)T}.$$

Сформулированную систему уравнений сложно обобщить для многомерного случая.

Для конкретных начальных и краевых условий необходимо сформулировать замыкающие соотношения и найти коэффициенты и зависимости, входящие в них. Большинство из входящих в замыкающие соотношения коэффициентов и зависимостей можно получить пока лишь эмпирическим путем. Поэтому для этого необходимо проведение ряда дополнительных экспериментальных исследований.

Определению теплофизических характеристик, коэффициентов проницаемости и некоторых других необходимых соотношений и коэффициентов посвящено достаточно много работ [16–28].

Тепло- и массоперенос в процессе горячего прессования во многом определяется интенсивностью баротермических воздействий на брикет, зависит от плотности, а следовательно, от относительных локальных деформаций материала. В свою очередь деформативные свойства брикета зависят от температуры, влажности и степени завершенности реакции отверждения связующего [29–32]. Все это говорит о наличии взаимосвязи процессов тепломассопереноса в капиллярнопористых композиционных материалах с их деформативностью и прочностью [33–37].

Использование исходного материала влажностью менее 8 % может значительно упростить данную модель плоского горячего прессования [1].

Выводы

Данная математическая модель протекающих при горячем прессовании композиционных материалов процессов, с конкретными краевыми условиями позволяет разработать на ее основе инженерные методы расчета и практические рекомендации по выбору рациональных технологических режимов и составов пресскомпозиции для получения материалов с заранее заданными свойствами и характеристиками.

На основании представленной математической модели рассчитаны оптимальные параметры процесса горячего прессования для производства плитных материалов на основе бумаги и термопластов в качестве связующего. При начальной влажности пресскомпозиции менее 8% возможно значительное упрощение данной модели, что делает ее использование более универсальным.

Список литературы

- [1] Черемисин Д.Г., Мкртчян В.Р., Иванкин А.Н., Устогов А.В., Маслов М.И., Никонорова А.А. Потенциальные возможности 3D-печати для получения композиционных материалов на основе синтетических и природных биополимеров (обзор) // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 5. С. 111–118.
DOI: 10.18698/2542-1468-2021-5-111-118
- [2] Шевляков А.А. Гидродинамика контактного слоя древесностружечного брикета в процессе прессования древесностружечных плит: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.05. Москва, 1994. 222 с.
- [3] Обливин А.Н. Моделирование свойств и процессов прессования реактопластов. М.: МГУЛ, 2005. 284 с.
- [4] Лыков А.В. Тепломассообмен. М.: Энергия, 1978. 479 с.
- [5] Bear J. Dynamics of Fluids in Porous Media. New York, USA: Elsevier, 1972, 764 p.
- [6] Whitaker S. Simultaneous Heat, Mass and Momentum Transfer in Porous Media. A Theory of Drying in Porous Media // Advances in Heat Transfer, vol. 13. New York, USA: Academic Press, 1977.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2717\(08\)70223-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2717(08)70223-5)
- [7] Bear J., Bachmat Y. Transport in Porous Media: Basic Equations. Corapcigli Editions, 1984, pp. 213–240.
- [8] Kaviany M. Principles of Heat Transfer in Porous Media. New York, USA: Springer, 1991, pp. 153–232.
- [9] De Vries D.A. The theory of heat and moisture transfer in porous media revisited // International J. of Heat and Mass Transfer, 1987, v. 7, pp. 1343–1350.
- [10] Fan J., Luo Z., Li Y. Heat and moisture transfer with sorption and condensation in porous clothing assemblies and numerical simulation // International J. of Heat and Mass Transfer, 2000, v. 43, no. 16, pp. 2989–3000.

- [11] Kulikovskii A.G. Evaporation and condensation fronts in porous media // *Fluid Dynamics*, 2002, v. 37, no. 5, pp. 740–746.
- [12] Larbi S. Some Aspects of Transport Phenomena Physics in the Capillary Porous Bodies // *Proceedings of the World Renewable Energy Congress 2005: Innovation In Europe: Renewable Energy, Technology, Innovation And The Environment*: Eds. M.S. Imbabi, C.P. Mitchell. University of Aberdeen, May 22–27, 2005. UK, Aberdeen: Elsevier Science, 2005, p. 193.
- [13] Малкин А.Я., Куличихин С.Г. Реология в процессах образования и превращения реактопластов. М.: Химия, 1981. 240 с.
- [14] Ставров В.П., Дедюхин В.Г., Соколов А.Д. Технологические испытания реактопластов. М.: Химия, 1981. 246 с.
- [15] Беликов В.В. Экструзионное формование реактопластов на основе измельченной древесины и фосфогипса: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.05. Москва, МЛТИ, 1992, 245 с.
- [16] Обливин А.Н. Теоретическое и экспериментальное исследование тепло- и массопереноса при контактом нагреве влажных пористых тел: дис. ... д-ра техн. наук 01.04.14. Москва, 1976. 204 с.
- [17] Пожиток А.И. Теоретическое и экспериментальное исследование интенсификации и оптимизации процесса прессования древесностружечных плит: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.05. Москва, МЛТИ, 1978. 293 с.
- [18] Темкин А.Г. Исследование нестационарного тепло- и массопереноса. Минск: Наука и техника, 1966. 250 с.
- [19] Щеглов П.П. Исследование термодинамических параметров и коэффициентов массопереноса в плитных материалах из измельченной древесины: автореферат дис. ... канд. техн. наук 05.21.05. Москва, МЛТИ, 1978. 20 с.
- [20] Luikov A.V. Systems of Differential Equations of Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies // *Review. International J. Heat Mass Transfer*, 1975, v. 18, no. 1, pp. 1–14.
- [21] Larbi S. Heat and mass transfer with interaction effects analysis between an external flow and a capillary porous body // *International Review of Mechanical Engineering*, 2008, v. 2, pp. 797–802.
- [22] Choudhary M.K., Karki, K.C., Patankar, S.V. Mathematical modeling of heat transfer, condensation, and capillary flow in porous insulation on a cold pipe // *International J. of Heat and Mass Transfer*, 2004, v. 47, no. 26, pp. 5629–5638.
- [23] Shapiro A.P., Motakef S. Unsteady heat and mass transfer with phase change in porous slabs: analytical solutions and experimental results // *International J. of Heat and Mass Transfer*, 1990, v. 33, no. 1, pp. 163–173.
- [24] Hanamura K., Kaviany M. Propagation of condensation front in steam injection into dry porous media // *International J. of Heat and Mass Transfer*, 1995, v. 38, no. 8, pp. 1377–1386.
- [25] Lenormand R., Zarcone C. Role of roughness and edges during imbibition in square capillaries // *Society of Petroleum Engineering*, 1984, v. 13, pp. 1–17.
- [26] Udell K.S. Heat transfer in porous media heated from above with evaporation, condensation, and capillary effects // *J. of Heat Transfer*, 1983, v. 105, no. 3, pp. 485–492.
- [27] Bridge L., Bradean R., Ward M.J., Wetton B.R. The analysis of a two-phase zone with condensation in a porous medium // *J. of Engineering Mathematics*, 2003, v. 45, no. 3–4, pp. 247–268.
- [28] Ogniewicz Y., Tien C.E. Analysis of condensation in porous insulation // *International J. of Heat and Mass Transfer*, 1986, v. 24, no. 3, pp. 421–429.
- [29] Обливин А.Н., Воскресенский А.К., Пожиток А.И. Теоретические основы расчета напряжений и деформаций в терморезистивных капиллярно-пористых телах // *Научные труды МЛТИ*, 1981. Вып. 138. С. 5–21.
- [30] Kar K.K. *Composite Materials: Processing, Applications, Characterizations*. Berlin: Springer-Verlag, 2017, p. 686.
- [31] Mallick P.K. *Composite Engineering Handbook*. New York, USA: Marcel Dekker, 1997, p. 616.
- [32] Тришин С.П., Никитин А.А. Изучение физико-механических и технологических свойств порошкообразных термопластичных связующих и плит // *Технология и оборудование для переработки древесины: науч. тр.*, 2015. Вып. 377. С. 114–119.
- [33] Пожиток А.И., Обливин А.Н. Теоретические основы тепло-массопереноса в капиллярно-пористых телах. М.: МЛТИ, 1984. 75 с.
- [34] Обливин А.Н., Воскресенский А.К., Пожиток А.И. Расчет процессов тепло-массопереноса при нагревании влажных пористых тел с учетом поверхностного испарения внутри макропор // *Научные труды МЛТИ. Вопросы теплопередачи*, 1977. Вып. 102. С. 5–31.
- [35] Trishin S.P., Nikitin A.A., Fedorenko D.V., Kireyeva A.F. Mining technology for producing wood chipboard with the use of thermoplastic binder // *Forest Complex Today: View of Young Researchers: Forest Industry and Engineering, Landscape Architecture, Woodworking Technology, Management and Economics: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*, vol. 1. St. Louis, Missouri, USA: S., 2017, pp. 228–233.
- [36] Тришин С.П., Никитин А.А. Изучение физико-механических и технологических свойств порошкообразных термопластичных связующих и плит // *Технология и оборудование для переработки древесины: науч. тр.*, 2015. Вып. 377. С. 114–119.
- [37] Ла Мантия Ф. *Вторичная переработка пластмасс*. СПб.: Профессия, 2006. 400 с.

Сведения об авторах

Гранкин Александр Юрьевич [✉] — ведущий программист отдела образовательных технологий, ассистент, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), grankin@bmstu.ru

Никитин Владимир Валентинович — д-р техн. наук, профессор, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), nikitinvv@bmstu.ru

Сидельников Иван Дмитриевич — канд. техн. наук, доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана, sid@bmstu.ru

Поступила в редакцию 12.12.2024.

Одобрено после рецензирования 20.12.2024.

Принята к публикации 06.02.2025.

MATHEMATICAL MODEL OF PAPER-POLYMER BOARD HOT PLATE PRESSING

A.Y. Grankin^{1✉}, V.V. Nikitin¹, I.D. Sidelnikov²

¹BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institut'skaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

²BMSTU, 5, 2nd Baumanskaya st., 105005, Moscow, Russia

grankin@bmstu.ru

The article considers the dynamics of changes in internal stresses in composite materials during the process of flat hot pressing, and describes the key factors affecting the strength characteristics of the press composite, such as temperature, humidity, vapor-gas mixture pressure and the degree of curing of the binder. A detailed analysis of layer-by-layer briquette formation is presented, taking into account for each layer the elastic resistance, vapour-gas mixture pressure and degree of binder curing. It is established that the tensile strength perpendicular to the plate is a function of temperature, moisture content, density and degree of curing, and also depends on the layer coordinates and time. The effect of pressing pressure on the process is studied, including the risks associated with exceeding the permissible pressure, which can lead to wear of the spacers and deterioration of the conditions for the release of the formed vapor-gas mixture. Completion of the pressing process is determined by the moment when the strength of the adhesive joint in the weakest section becomes equal to or exceeds the internal stresses. For successful modeling of the process, it is necessary to take into account the law of loading, pressure and temperature fields, as well as the density (porosity) distribution in the briquette. The proposed mathematical model of the processes occurring during hot pressing of composite materials with specific boundary conditions allows one to develop, on its basis, engineering calculation methods and practical recommendations for the selection of rational technological pressing modes and press compositions for obtaining materials with predetermined properties. However, further experimental studies are necessary to clarify the coefficients and dependencies included in the closing relations. This work contributes to a better understanding of the processes of heat and mass transfer occurring during pressing in capillary-porous composite materials and their relationship with mechanical properties, which is important for optimizing hot pressing technologies and improving the quality of final products.

Keywords: mathematical model, heat and mass transfer model, rheological model, paper waste, thermosetting binder, composite materials, flat pressing

Suggested citation: Grankin A.Y., Nikitin V.V., Sidelnikov I.D. *Matematicheskaya model' ploskogo goryachego pressovaniya bumazhno-polimernykh plit* [Mathematical model of paper-polymer board hot plate pressing]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 2, pp. 147–158.

DOI: 10.18698/2542-1468-2025-2-147-158

References

- [1] Cheremisin D.G., Mkrтчan V.R., Ivankin A.N., Ustyugov A.V., Maslov M.I., Nikonorova A.A. *Potentsial'nye vozmozhnosti 3D-pechati dlya polucheniya kompozitsionnykh materialov na osnove prirodnykh bio i sinteticheskikh polimerov (obzor)* [Potential possibilities of 3D-printing for producing composite materials based on natural bio and synthetic polymers (a review)]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 5, pp. 111–118. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-5-111-118
- [2] Shevlyakov A.A. *Gidrodinamika kontaktного sloya drevesnostruzhechnogo briketa v protsesse pressovaniya drevesnostruzhechnykh plit* [Hydrodynamics of the contact layer of a wood chip briquette during the pressing of chipboards]. Dis. Cand. Sci (Tech.) 05.21.05. Moscow, 1994, 222 p.

- [3] Oblivin A.N. *Modelirovaniye svoystv i protsessov pressovaniya reaktoplastov* [Modeling of Properties and Pressing Processes of Thermosets]. Moscow: MSFU, 2005, 284 p.
- [4] Lykov A.V. *Teplomassoobmen* [Heat and Mass Transfer]. Moscow: Energiya, 1978, 479 p.
- [5] Bear J. Dynamics of Fluids in Porous Media. New York, USA: Elsevier, 1972, 764 p.
- [6] Whitaker S. Simultaneous Heat, Mass and Momentum Transfer in Porous Media. A Theory of Drying in Porous Media. *Advances in Heat Transfer*, vol. 13. New York, USA: Academic Press, 1977.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2717\(08\)70223-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2717(08)70223-5)
- [7] Bear J., Bachmat Y. Transport in Porous Media: Basic Equations. Corapcigli Editions, 1984, pp. 213–240.
- [8] Kaviany M. Principles of Heat Transfer in Porous Media. New York, USA: Springer, 1991, pp. 153–232.
- [9] De Vries D.A. The theory of heat and moisture transfer in porous media revisited. *International J. of Heat and Mass Transfer*, 1987, v. 7, pp. 1343–1350.
- [10] Fan J., Luo Z., Li Y. Heat and moisture transfer with sorption and condensation in porous clothing assemblies and numerical simulation. *International J. of Heat and Mass Transfer*, 2000, v. 43, no. 16, pp. 2989–3000.
- [11] Kulikovskii A.G. Evaporation and condensation fronts in porous media. *Fluid Dynamics*, 2002, v. 37, no. 5, pp. 740–746.
- [12] Larbi S. Some Aspects of Transport Phenomena Physics in the Capillary Porous Bodies. *Proceedings of the World Renewable Energy Congress 2005: Innovation In Europe: Renewable Energy, Technology, Innovation and The Environment*. Eds. M.S. Imbabi, C.P. Mitchell. University of Aberdeen, May 22–27, 2005. UK, Aberdeen: Elsevier Science, 2005, p. 193.
- [13] Malkin A.Ya., Kulichikhin, S.G. *Reologiya v protsessakh obrazovaniya i prevrashcheniya reaktoplastov* [Rheology in the Processes of Formation and Transformation of Thermosets]. Moscow: Khimiya [Chemistry], 1981, 240 p.
- [14] Stavrov V.P., Dedyukhin V.G., Sokolov A.D. *Tekhnologicheskie ispytaniya reaktoplastov* [Technological Testing of Thermosets]. Moscow: Khimiya [Chemistry], 1981, 246 p.
- [15] Belikov V.V. *Ekstruzionnoe formovanie reaktoplastov na osnove izmel'chennoy drevesiny i fosfogipsa* [Extrusion Molding of Thermosets Based on Crushed Wood and Phosphogypsum]. Dis. Cand. Sci (Tech.) 05.21.05. Moscow, MLTI, 1992, 245 p.
- [16] Oblivin A.N. *Teoreticheskoe i eksperimental'noe issledovanie teplo- i massoperenosa pri kontaktnom nagreve vlazhnykh poristykh tel* [Theoretical and experimental study of heat and mass transfer during contact heating of wet porous bodies]. Dis. Dr. Sci (Tech.) 01.04.14. Moscow, 1976, 204 p.
- [17] Pozhitok A.I. *Teoreticheskoe i eksperimental'noe issledovanie intensifikatsii i optimizatsii protsessa pressovaniya drevesnostruzhechnykh plit* [Theoretical and experimental study of intensification and optimization of the pressing process of particle boards]. Dis. Cand. Sci (Tech.) 05.21.05. Moscow, MLTI, 1978, 293 p.
- [18] Temkin A.G. *Issledovanie nestatsionarnogo teplo- i massoperenosa* [Study of non-stationary heat and mass transfer]. Minsk: Nauka i tekhnika [Science and Technology], 1966, 250 p.
- [19] Shcheglov P.P. *Issledovanie termodinamicheskikh parametrov i koeffitsientov massoperenosa v plitnykh materialakh iz izmel'chennoy drevesiny* [Study of thermodynamic parameters and mass transfer coefficients in board materials from crushed wood]. Dis. Cand. Sci (Tech.) 05.21.05. Moscow, MLTI, 1978, 20 p.
- [20] Luikov A.V. Systems of Differential Equations of Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies. Review. *International J. Heat Mass Transfer*, 1975, v. 18, no. 1, pp. 1–14.
- [21] Larbi S. Heat and mass transfer with interaction effects analysis between an external flow and a capillary porous body. *International Review of Mechanical Engineering*, 2008, v. 2, pp. 797–802.
- [22] Choudhary M.K., Karki, K.C., Patankar, S.V. Mathematical modeling of heat transfer, condensation, and capillary flow in porous insulation on a cold pipe. *International J. of Heat and Mass Transfer*, 2004, v. 47, no. 26, pp. 5629–5638.
- [23] Shapiro A.P., Motakef S. Unsteady heat and mass transfer with phase change in porous slabs: analytical solutions and experimental results. *International J. of Heat and Mass Transfer*, 1990, v. 33, no. 1, pp. 163–173.
- [24] Hanamura K., Kaviany M. Propagation of condensation front in steam injection into dry porous media. *International J. of Heat and Mass Transfer*, 1995, v. 38, no. 8, pp. 1377–1386.
- [25] Lenormand R., Zarcone C. Role of roughness and edges during imbibition in square capillaries. *Society of Petroleum Engineering*, 1984, v. 13, pp. 1–17.
- [26] Udell K.S. Heat transfer in porous media heated from above with evaporation, condensation, and capillary effects. *J. of Heat Transfer*, 1983, v. 105, no. 3, pp. 485–492.
- [27] Bridge L., Bradean R., Ward M.J., Wetton B.R. The analysis of a two-phase zone with condensation in a porous medium. *J. of Engineering Mathematics*, 2003, v. 45, no. 3–4, pp. 247–268.
- [28] Ogniewicz Y., Tien C.E. Analysis of condensation in porous insulation. *International J. of Heat and Mass Transfer*, 1986, v. 24, no. 3, pp. 421–429.
- [29] Oblivin A.N., Voskresenskiy A.K., Pozhitok A.I. *Teoreticheskie osnovy rascheta napryazheniy i deformatsiy v termoreaktivnykh kapillyarno-poristykh telakh* [Theoretical foundations for calculating stresses and strains in thermosetting capillary-porous bodies]. Nauchnye trudy MLTI [Scientific works of MLTI], 1981, iss. 138, pp. 5–21.
- [30] Kar K.K. Composite Materials: Processing, Applications, Characterizations. Berlin: Springer-Verlag, 2017, p. 686.
- [31] Mallick P.K. Composite Engineering Handbook. New York, USA: Marcel Dekker, 1997, p. 616.
- [32] Trishin S.P., Nikitin, A.A. *Izuchenie fiziko-mekhanicheskikh i tekhnologicheskikh svoystv poroshkoobraznykh termoplastichnykh svyazuyushchikh i plit* [Study of physicommechanical and technological properties of powdered thermoplastic binders and boards]. Tekhnologiya i oborudovanie dlya pererabotki drevesiny: nauchnye trudy [Technology and equipment for wood processing: scientific works], 2015, iss. 377, pp. 114–119.
- [33] Pozhitok A.I., Oblivin, A.N. *Teoreticheskie osnovy teplomassoperenosa v kapillyarno-poristykh telakh* [Theoretical Foundations of Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies]. Moscow: MLTI, 1984, 75 p.

- [34] Oblivin A.N., Voskresenskiy, A.K., Pozhitok, A.I. *Raschet protsessov teplomassoperenosa pri nagrevanii vlazhnykh poristykh tel s uchetom poverkhnostnogo ispareniya vnutri makropor* [Calculation of Heat and Mass Transfer Processes During Heating of Wet Porous Bodies Taking into Account Surface Evaporation Inside Macropores]. Nauchnye trudy MLTI. Voprosy teploperedachi [Scientific Works of MLTI. Heat Transfer Issues], 1977, iss 102, pp. 5–31.
- [35] Trishin S.P., Nikitin A.A., Fedorenko D.V., Kireyeva A.F. Mining technology for producing wood chipboard with the use of thermoplastic binder. Forest Complex Today: View of Young Researchers: Forest Industry and Engineering, Landscape Architecture, Woodworking Technology, Management and Economics: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, vol. 1. St. Louis, Missouri, USA: S., 2017, pp. 228–233.
- [36] Trishin S.P., Nikitin A.A. *Izuchenie fiziko-mekhanicheskikh i tekhnologicheskikh svoystv poroshkoobraznykh termoplastichnykh svyazuyushchikh i plit* [Study of Physical, Mechanical and Technological Properties of Powdered Thermoplastic Binders and Boards]. Tekhnologiya i oborudovanie dlya pererabotki drevesiny: Nauchnye trudy [Technology and Equipment for Wood Processing: Scientific Works], 2015, iss 377, pp. 114–119.

Authors' information

Grankin Aleksandr Yur'evich✉ — Lead Programmer of the BMSTU (Mytishchi branch),
grankin@bmstu.ru

Nikitin Vladimir Valentinovich — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch),
nikitinvv@bmstu.ru

Sidelnikov Ivan Dmitrievich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU, sid@bmstu.ru

Received 12.12.2024.

Approved after review 20.12.2024.

Accepted for publication 06.02.2025.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

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

The authors declare that there is no conflict of interest