

# ЛЕСНОЙ ВЕСТНИК / FORESTRY BULLETIN

Научно-информационный журнал

№ 2 ' 2020 Том 24

## Главный редактор

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

## Редакционный совет журнала

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

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

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

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

**Бурмистрова Ольга Николаевна**, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет»

**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, проректор по науке и инновациям ФГБОУ ВПО «ВГЛТА», Воронеж

**Евдокимов Юрий Михайлович**, канд. хим. наук, профессор, академик Нью-Йоркской академии наук, чл.-корр. РАЕН, член центрального правления Нанотехнологического общества России, Москва

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

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

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

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

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

**Ковачев Атанас**, д-р архитектуры, профессор, член-корр. Болгарской АН, профессор Международной Академии

Архитектуры, Лесотехнический университет, Болгария, Варна

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

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

Совета ОАО «НПО ИТ», Королёв

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

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

**Котиев Георгий Олегович**, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

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

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

**Леонтьев Александр Иванович**, д-р техн. наук, профессор, академик РАН, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

**Липаткин Владимир Александрович**, канд. биол. наук, профессор, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

**Лукина Наталья Васильевна**, член-корреспондент РАН, профессор, директор ЦЭПЛ РАН, зам. Председателя Научного совета по лесу РАН, Москва

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

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

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

**Моисеев Николай Александрович**, д-р с.-х. наук, профессор, академик РАН, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

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

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

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

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

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

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

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

**Стрекалов Александр Федорович**, канд. техн. наук, РКК «Энергия», ЗАО «ЗЭМ», Королёв

**Теодоронский Владимир Сергеевич**, д-р с.-х. наук, профессор, академик РАЕН, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

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

отделения, ученый секретарь Совета ЦУП ЦНИИМАШ, Королёв

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

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

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

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

**Шадрин Анатолий Александрович**, д-р техн. наук, профессор, академик РАЕН, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

**Шегельман Илья Романович**, д-р техн. наук, профессор, Управление научных исследований, базовая кафедра

«Сквозные технологии и экономическая безопасность», главный научный сотрудник ПетрГУ, Петрозаводск

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

**Щепаченко Дмитрий Геннадьевич**, д-р биол. наук, доцент, старший научный сотрудник Международного института прикладного системного анализа (IIASA), Австрия

Ответственный секретарь Расева Елена Александровна

Редактор Л.В. Сивай

Перевод М.А. Карпухиной

Электронная версия Ю.А. Рязжской

Учредитель МГТУ им. Н.Э. Баумана

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

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-68118 от 21.12.2016

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

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

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

Дата выхода в свет .04.2020.

Тираж 600 экз.

Заказ №

Объем 15, п. л.

Цена свободная

# LESNOY VESTNIK / FORESTRY BULLETIN

Scientific Information Journal  
№ 2 ' 2020 Vol. 24

## Editor-in-chief

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

## Editorial council of the journal

**Artamonov Dmitriy Vladimirovich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Penza State

**Ashraf Darwish**, Associate Professor of Computer Science, Faculty of Computer Science, Helwan University, Cairo, Egypt, Machine Intelligence Research Labs (MIR Labs), USA

**Belyaev Mikhail Yur'evich**, Dr. Sci. (Tech.), Head of Department, Deputy Director of S.P. Korolev RSC «Energia», Moscow

**Bemman Al'brekht**, Professor, the Dresden technical university, professorate Institute for countries of Eastern Europe, Germany

**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.), Vice-Rector for Science and Innovation Voronezh State Academy of Forestry, 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

**Zalesov Sergey Veniaminovich**, Professor, the Dr. Sci. (Agric.), USFEU, Ekaterinburg

**Zaprudnov Vyacheslav Il'ich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

**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., Professor, University of Forestry, Bulgaria, Sofia

**Kokh Nil's Elers**, Professor, the Dr. of agronomics in the field of forest policy, the President of IUFRO, the Center of forest and landscape planning of university Copenhagen, Denmark

**Komarov Evgeniy Gennadievich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

**Korol'kov Anatoliy Vladimirovich**, Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

**Kotiev George Olegovich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

**Kozlov Aleksandr Il'ich**, Ph. D. (Tech.), Scientific Secretary of the Board of «NPO IT», Korolev

**Kozhukhov Nikolay Ivanovich**, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Econ.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

**Krott Maks**, Professor of Forest politics specialization, George-August-Universität, Goettingen

**Leont'ev Aleksandr Ivanovich**, Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor, Dr. Sci. (Tech.), BMSTU, Moscow

**Lipatkin Vladimir Aleksandrovich**, Professor, Ph. D. (Biol.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

**Lukina Natalya Vasilyevna**, Corresponding Member of the RAS, Director of the Center for Sub-Settlement Research RAS, Deputy Chairperson of the Forest Research Council

**Malashin Alexey Anatolyevich**, Professor, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

**Martynyuk Aleksandr Aleksandrovich**, Dr. Sci. (Agric.), VNIILM, Moscow

**Melekhov Vladimir Ivanovich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, NARFU, Arkhangelsk

**Moiseev Nikolay Aleksandrovich**, Professor, Dr. Sci. (Agric.) academician of the Russian Academy of Sciences, BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

**Niemz Peter**, Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c., Prof. for Wood Physics, ETH Zurich (Swiss Federal Institute of Technology in Zurich; Eidgenössische Technische Hochschule Zurich)

**Oblivin Aleksandr Nikolaevich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Academician of the Russian Academy of Natural Sciences and MANVSH, Honored worker of science and equipment of the Russian Federation, BMSTU, Moscow

**Pasztory, Zoltan**, Dr. Ph.D., Director of Innovation Center, University of Sopron, Sopron, Hungary

**Poleshchuk Ol'ga Mitrofanovna**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

**Poluektov Nikolai Pavlovich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

**Rodin Sergey Anatol'evich**, Professor, the Dr. Sci. (Agric.), ARRISMF, Moscow

**Rykunin Stanislav Nikolaevich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

**Shadrin Anatoliy Aleksandrovich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

**Shegelman Ilya Romanovich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), PSU, Petrozvodsk

**Shchepashchenko Dmitry Gennadievich**, Associate Professor, Dr. Sci. (Biol.), Senior Researcher, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Austria

**Shimkovich Dmitriy Grigor'evich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), OOO «Kudesnik», Moscow

**Strekalov Aleksandr Fedorovich**, Ph. D. (Tech.), Rocket and space corporation «ENERGIA», Korolev

**Teodoronskiy Vladimir Sergeevich**, Professor, Dr. Sci. (Agric.), academician of the Russian Academy of Natural Sciences, BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

**Titov Anatoliy Matveevich**, Ph. D. (Tech.), Deputy Chief of Department, Scientific Secretary of the Board of MCC TSNIIMASH, Korolev

**Trichkov Neno Ivanov**, professor, Dr., Vice-Rector for Research, Forestry University, Sofia, Bulgaria

**Fedotov Gennadiy Nikolaevich**, Dr. Sci. (Biol.), Lomonosov Moscow State University, Moscow

Assistant Editor Raseva Elena Aleksandrovna

Editor L.V. Sivay

Translation by M.A. Karpukhina

Electronic version by Yu.A. Ryazhskaya

## Founder BMSTU

The Journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media Certificate on registration ПИ № ФС 77-68118 of 21.12.2016

The journal is included in the list of approved VAK of the Russian Federation for editions for the publication of works of competitors of scientific degrees Materials of the present magazine can be reprinted and reproduced fully or partly with the written permission of publishing house It has been published since 1997

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

It is sent for the press .04.2020.  
Circulation 600 copies  
Order №  
Volume 15,0 p. p.  
Price free

# СОДЕРЖАНИЕ

## БИОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА

<b>Данчева А.В., Залесов С.В., Муканов Б.М.</b> Влияние климатических факторов на радиальный прирост сосны в ленточных борах Прииртышья .....	5
<b>Мерзленко М.Д., Мельник П.Г., Маликов А.Н.</b> Динамика роста лиственнично-еловых лесных культур К.Ф. Тюрмера .....	11
<b>Минина Н.Н., Гилимшина Л.И.</b> Анализ и ресурсная характеристика флоры окрестностей Кармановского водохранилища Республики Башкортостан .....	17
<b>Плюснина С.Н., Федорков А.Л.</b> Структура листа осины обыкновенной <i>Populus tremula</i> L. и осины гибридной ( <i>Populus tremula</i> L. × <i>Populus tremuloides</i> Michx.) (Salicaceae) в клоновом архиве .....	23
<b>Аковецкий В.Г., Афанасьев А.В.</b> Методы и технологии интерпретации аэрокосмических мониторинговых наблюдений лесной растительности .....	29
<b>Федотов Г.Н., Шалаев В.С., Батырев Ю.П.</b> Аллелотоксичность почв, механизмы ее возникновения и возможные пути снижения .....	37

## ДЕРЕВООБРАБОТКА И ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

<b>Борчок Э., Сутон Ш., Пастори Э.</b> Влияние термической обработки на строение древесины гевеи бразильской ( <i>Hevea brasiliensis</i> Müll. Arg.) .....	43
<b>Галкин В.П., Курышов Г.Н., Косарин А.А., Моисеев С.А., Деянов Д.И.</b> Сушка крупномерных пило- и лесоматериалов .....	51
<b>Рыбин Б.М., Завражнова И.А., Рыбин Д.Б.</b> К вопросу стандартизации метода определения блеска прозрачных лаковых покрытий на древесине и древесных материалах .....	57
<b>Фокин С.В., Фомина О.А.</b> К вопросу производства энергетическодисковыми рубительными машинами с различными способами выброса щепы .....	68
<b>Кольниченко Г.И., Лавриченко В.А., Тарлаков Я.В., Сиротов В.А.</b> Использование топливной древесины в условиях распределенной энергетики .....	74
<b>Кононов Г.Н., Веревкин А.Н., Сердюкова Ю.В., Зайцев В.Д.</b> Миколиз древесины, его продукты и их использование. I. Экологические аспекты микологического разрушения древесины .....	81
<b>Хакимова Ф.Х., Синяев К.А., Хакимов Р.Р., Носкова О.А.</b> Молодая тонкомерная древесина от рубок ухода за лесом — резерв сырья для производства целлюлозы и бумаги .....	88
<b>Лоскутов С.Р., Петрунина Е.А., Шапченкова О.А., Пляшечник М.А., Стасова В.В.</b> Физико-химические показатели коры лиственницы сибирской: натуральной, химически модифицированной и после адсорбции катионов тяжелых металлов .....	98
<b>Фалёва А.В., Белесов А.В., Кожевников А.Ю.</b> Изучение химической структуры лигнина камнеломки супротивнолистной ( <i>Saxifraga oppositifolia</i> L.) методами ИК- и ЯМР-спектроскопии .....	111
<b>Семкина Л.И., Сарана Н.В., Лепешкина Е.В., Товстошкуров Е.М., Горячев Н.Л., Тюрин Е.Т., Зуйков А.А., Константинова С.А., Новиков А.А., Аникушин Б.М., Винокуров В.А.</b> Применение нанофибриллярной целлюлозы в композиции бумаги для гофрирования .....	119

# CONTENTS

## BIOLOGICAL AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF FORESTRY

<b>Dancheva A.V., Zalesov S.V., Mukanov B.M.</b> Climatic factors influence on radial pine growth in ribbon pine forests in the Irtysh land .....	5
<b>Merzlenko M.D., Melnik P.G., Malikov A.N.</b> Growth dynamics of larch-spruce mixed stands established by K.F. Turmer .....	11
<b>Minina N.N., Gilimshina L.I.</b> Analysis and resource characteristics of flora surrounding Karmanovo reservoir in Bashkortostan Republic .....	17
<b>Plyusnina S.N., Fedorkov A.L.</b> Leaf structure of european aspen <i>Populus tremula</i> L. and hybrid aspen ( <i>Populus tremula</i> L. × <i>Populus tremuloides</i> Michx.) (Salicaceae) in clone bank .....	23
<b>Akovetsky V.G., Afanasyev A.V.</b> Methods and technologies for forest vegetation aerospace monitoring interpretation .....	29
<b>Fedotov G.N., Shalaev V.S., Batyrev Yu.P.</b> Allelotoxicity of soils, mechanisms of its occurrence and possible ways of reduction .....	37

## WOODWORKING AND CHEMICAL WOOD PROCESSING

<b>Böröcsök Z., Suthon S., Zoltán Pásztor Z.</b> Effect of heat treatment on some cellular properties of rubberwood ( <i>Hevea brasiliensis</i> Müll. Arg.) .....	43
<b>Galkin V.P., Kuryshov G.N., Kosarin A.A., Moiseev S.A., Deyanov D.I.</b> Large sized wood and timber seasoning .....	51
<b>Rybin B.M., Zavrazhnova I.A., Rybin D.B.</b> Method standardization for determining gloss of transparent laquered coatings on wood and wood materials .....	57
<b>Fokin S.V., Fomina O.A.</b> Energy wood production by disk chippers with various methods of chip discharge .....	68
<b>Kolnichenko G.I., Lavrichenko V.A., Tarlakov Y.V., Sirotoy A.V.</b> Fuel wood for distributed power generation .....	74
<b>Kononov G.N., Verevkin A.N., Serdyukova Yu.V., Zaitsev V.D.</b> Wood mycolysis, its products and their use. I. Ecological aspects of mycological wood destruction .....	81
<b>Khakimova F.Kh., Sinyaev K.A., Khakimov R.R., Noskova O.A.</b> Young thin wood from sanitation cuttings as stockpile of raw materials for pulp and paper production .....	88
<b>Loskutov S.R., Petrunina E.A., Shapchenkova O.A., Plyashechnik M.A., Stasova V.V.</b> Physicochemical properties of natural, chemically modified, and post- heavy-metal- cation-adsorption Siberian Larch Bark .....	98
<b>Faleva A.V., Belesov A.V., Kozhevnikov A.Yu.</b> Lignin chemical structure of Mountain saxifrage ( <i>Saxifraga oppositifolia</i> L.) study by IR- and NMR-spectroscopy .....	111
<b>Semkina L.I., Sarana N.V., Lepeshkina E.V., Tovstoshkurov E.M., Goraychev N.L., Tyurin E.T., Zuiikov A.A., Konstantinova S.A., Novikov A.A.</b> Nanofibrillated cellulose in the composition of corrugating paper .....	119

## ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА РАДИАЛЬНЫЙ ПРИРОСТ СОСНЫ В ЛЕНТОЧНЫХ БОРАХ ПРИИРТЫШЬЯ

А.В. Данчева<sup>1</sup>, С.В. Залесов<sup>2</sup>, Б.М. Муқанов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казахский научно-исследовательский институт лесного хозяйства и агролесомелиорации, 021704, Казахстан, г. Щучинск, ул. Кирова, д. 58

<sup>2</sup>Уральский государственный лесотехнический университет, 620110, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, д. 37

a.dancheva@mail.ru

Представлены результаты дендроклиматологического исследования годичных колец сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), произрастающей в лесорастительных условиях ленточных боров Прииртышья (Восточный регион Казахстана). Рассмотрены основные причины климатической обусловленности сезонной изменчивости радиального прироста сосны. Установлено, что на ширину годичного кольца в наибольшей степени оказывает влияние температура воздуха и в наименьшей степени — количество атмосферных осадков. Тесная зависимость радиального прироста сосны от количества осадков, отмеченная в середине XX в. (1952–1962), резко снижалась на протяжении последующих 50 лет. Установлена общая тенденция увеличения влияния температуры воздуха (август — сентябрь) и количества осадков (август) конца вегетационного периода предшествующего года в течение последних 15–20 лет на радиальный прирост сосны обыкновенной.

**Ключевые слова:** сосновые древостои, радиальный прирост, климатические факторы, дендроклиматология

**Ссылка для цитирования:** Данчева А.В., Залесов С.В., Муқанов Б.М. Влияние климатических факторов на радиальный прирост сосны в ленточных борах Прииртышья // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 2. С. 5–10. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-5-10

В последнее время проводятся обширные исследования реагирования лесных экосистем и их компонентов на изменение климата в различных районах произрастания бореальных и умеренных лесов (Европы, Азии, Северной Америки), в частности в России [1, 2]. Однако пока нет ясности в прямых и обратных связях между глобальными и локальными изменениями климата и лесными экосистемами. Чтобы понять, как именно функционируют леса, как формируется их биологическое разнообразие, важно оценить глубину взаимодействия климата и леса, а также выяснить, какое влияние окажут будущие изменения климата на экологическую и экономическую стабильность лесов.

Определение изменений в составе экологических систем, биогеоценозов, природных комплексов и их продуктивности (экологический мониторинг) не имеет единой системы учетных показателей [3]. Степень нарушения природных комплексов, биогеоценозов, отдельных составляющих биосферу компонентов определяют путем сравнения их с ненарушенными экосистемами по некоторым признакам и характеристикам, по динамике поддающихся учету изменений. Вопросы установления степени и характера влияния на лес природных процессов и антропогенных факторов можно решить, применяя дендрохронологические методы исследований.

В Казахстане, в частности в Восточном регионе, при глубокой изученности вопроса влияния отдельных климатических, лесорастительных и антропогенных факторов на динамику прироста

деревьев (радиального, линейного и т. д.), не проводятся исследования с использованием дендрохронологических и дендроклиматологических методов при оценке состояния лесных насаждений, поэтому данное направление признано актуальным.

### Цель работы

Цель работы — изучение влияния климатических факторов (количества осадков, температуры воздуха) на формирование радиального прироста сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), произрастающей в Восточно-Казахстанском регионе (ленточных борах Прииртышья) методами дендрохронологического и дендроклиматологического анализов.

### Объекты и методы исследований

Объектами исследования служили сосновые древостои, произрастающие в сухих лесорастительных условиях (группа типов леса — С<sub>2</sub>) ленточных боров Прииртышья Восточного региона Казахстана.

Анализ проводился по данным 27 кернов, собранных на заложённой для этих целей пробной площади (ПП) ПП-4-С в Пригородном лесничестве Семипалатинского филиала Государственного лесного природного резервата ГЛПР «Семей орманы».

Закладка ПП и определение лесотаксационных параметров древостоев проводились в соответствии с общепринятыми в лесоводстве методиками [4].

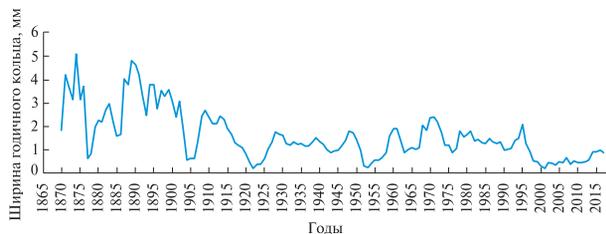


Рис. 1. Общая дендрохронологическая характеристика деревьев сосны обыкновенной

Fig. 1. General dendrochronological characteristics of Scots pine

Отбор древостоев и деревьев для изучения влияния климатических факторов (температуры воздуха и количества осадков) и пожаров осуществлялся по существующей на сегодняшний день методике дендрохронологических исследований [5].

В камеральных условиях годичные кольца сосны измеряли на измерительном комплексе LINTAB 5 с точностью до 0,01 мм. Образцы были перекрестно датированы с использованием программ TSAP 3.0 [6] и COFESHA [7]. Для устранения влияния возраста деревьев и других факторов неклиматического характера на динамику радиального прироста была проведена стандартизация индивидуальных серий прироста в программе ARSTAN [8]. Серии, у которых изменчивость не описывалась экспоненциальной кривой, были исключены из анализа. В этой же программе на основе стандартизированных индивидуальных хронологий были получены обобщенные древесно-кольцевые хронологии (ДКХ) индексов прироста и проведена оценка синхронности между временными рядами индексов прироста обобщенной хронологии, количеством осадков и температурой воздуха за различные периоды времени.

Для расчета связей климатических факторов с индексами ширины годичных колец были использованы метеорологические данные метеостанции г. Щучинск. Корреляционный анализ между индексами ширины годичного кольца и климатическими факторами (температурой воздуха и количеством осадков) был выполнен в программе Dendroclim 2002 [9]. Методом плавающей корреляции (50-летней скользящей средней) проведен анализ связи между температурой воздуха и количеством осадков и индексами прироста для погодичной оценки динамики корреляционной связи.

Полученные данные статистически обработаны с использованием средств электронной таблицы Microsoft Excel.

**Результаты исследований**

Исследуемые сосняки представляют собой одновозрастные чистые по составу (10С), низкополнотные древостои:

Относительная полнота <i>P</i> .....	0,3
Класс возраста .....	VIII

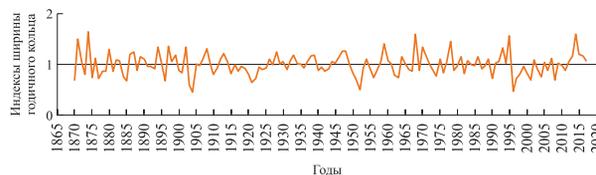


Рис. 2. Индексированная древесно-кольцевая хронология сосны

Fig. 2. Indexed tree-ring chronology of pine

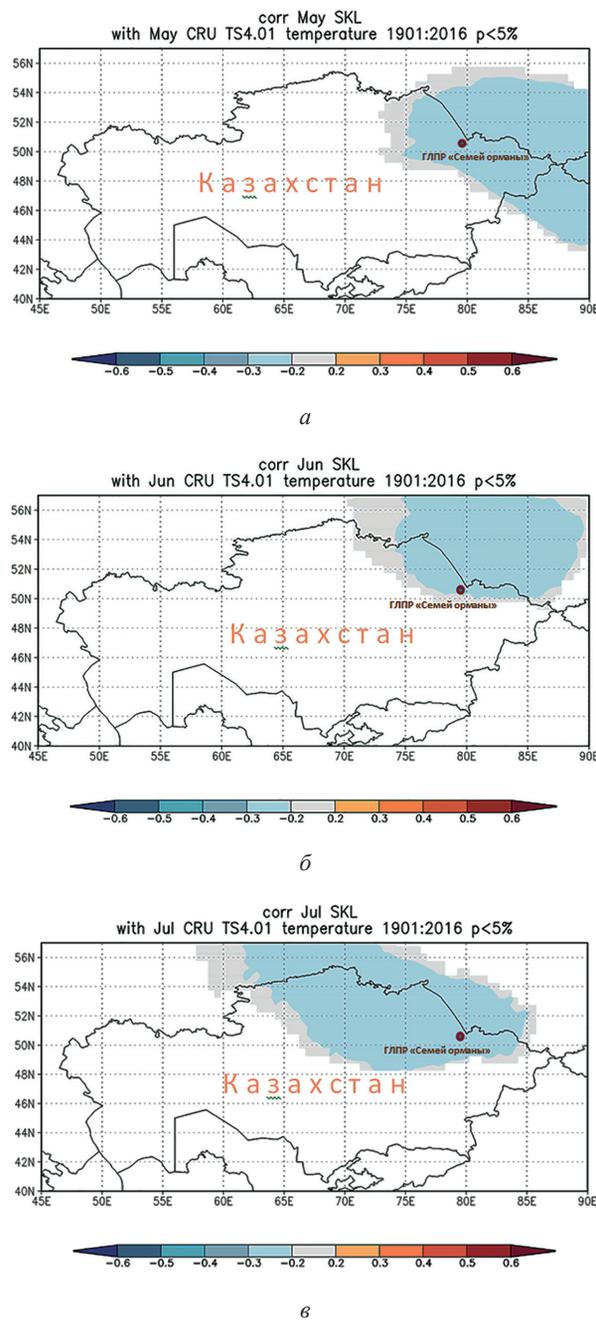


Рис. 3. Корреляция древесно-кольцевой хронологии сосны в ГЛПР «Семей орманы» с гридами по температуре воздуха в мае (а), июне (б) и июле (в)

Fig. 3. Correlation of the pine tree-ring chronology in the SFNR «Semey ormany» with grids by air temperature in May (a), June (b) and July (v)

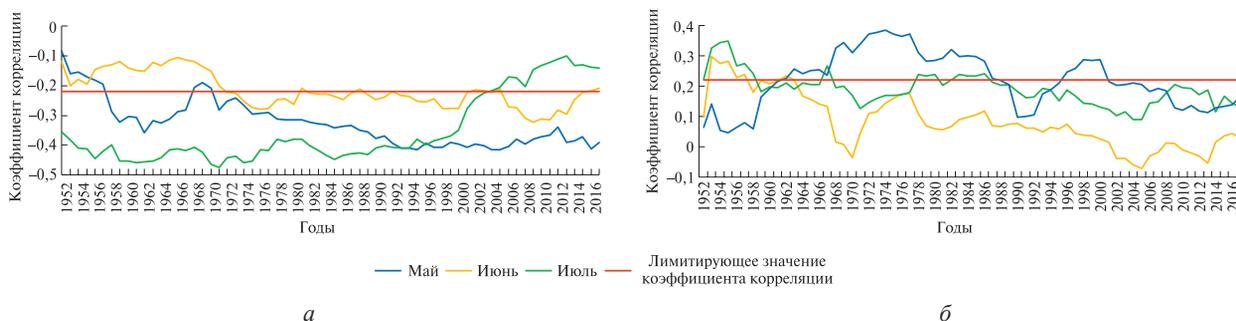


Рис. 4. Коэффициенты корреляции между индексированной хронологией сосны ГЛПР «Семей орманы» и температурой воздуха (а) и количеством осадков (б)

Fig. 4. The correlation coefficients between the indexed chronology of pine SFNR «Semey ormany» and air temperature (a) and rainfall (b)

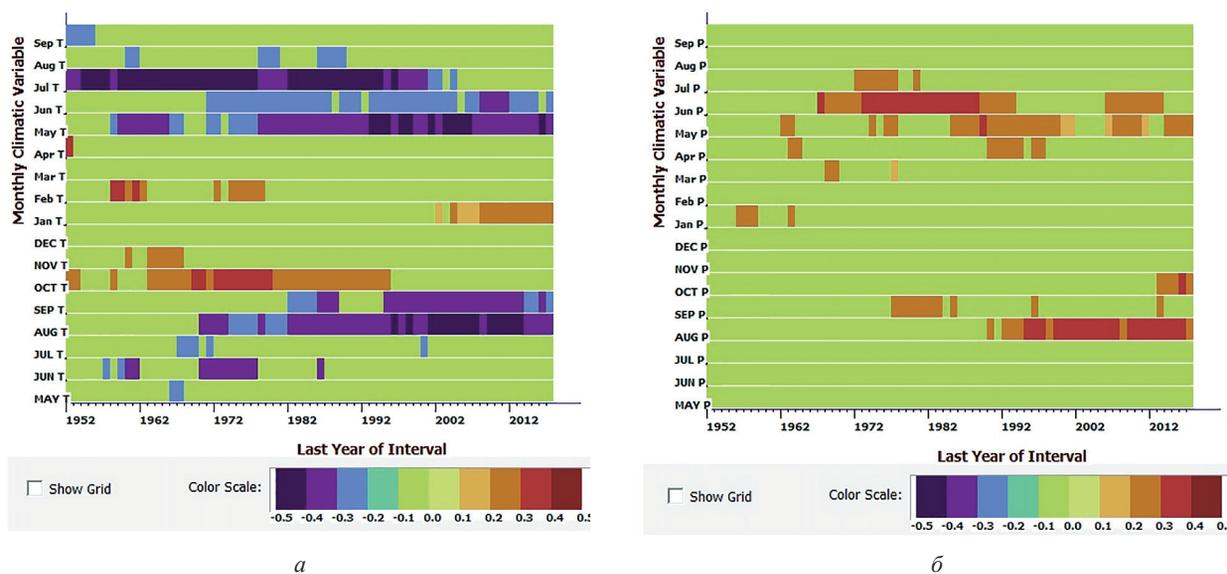


Рис. 5. Иллюстрация результатов Бутстрап-анализа стабильности связи между древесно-кольцевой хронологией сосны ГЛПР «Семей орманы» и температурой воздуха (а) и количеством осадков (б) в течение 50 лет

Fig. 5. The Bootstrap analysis results of the relationship stability between the tree-ring chronology of pine in SFNR «Semey ormany» and air temperature (a) and rainfall (b) within 50 years

Класс бонитета ..... IV  
 Средний диаметр ствола, см ..... 30,4 ± 1,0  
 Высота, м ..... 18,1 ± 0,3  
 Запас древесины, м<sup>3</sup>/га ..... 106  
 Длина полученной обобщенной хронологии сосны (рис. 1) составляет 147 лет (1870–2017), при этом хорошо выражены возрастные кривые. Средняя корреляция между сериями высокая — 0,75, средняя чувствительность 0,22, что соответствует среднему значению по лесостепной зоне [10].

После проведения стандартизации и индексирования была получена обобщенная хронология, которая имеет слабую автокорреляционную составляющую или не имеет ее вообще (рис. 2). Изменчивость индексов составляет от 0,2 до 1,6. Полученные индексы прироста использовались для оценки климатического влияния на годовичные кольца.

Предварительная оценка корреляционной связи между древесно-кольцевой хронологией и температурой воздуха, полученная путем построения планетарной климатической сети с шагом в 0,5 град (рис. 3), имеет наиболее тесные связи с регионом Восточного Казахстана. Выявлены связи с температурой мая, июня и июля. На основании полученных данных для проведения дальнейшего анализа были использованы данные метеостанции «Семья» (период наблюдений 1923–2018 гг.).

Стабильность связи «климат — рост» была проверена с помощью бутстрап-анализа скользящей средней с окном 50 лет с помощью Dendroclim2002. В анализ связи радиального прироста деревьев с температурой воздуха закладывались данные о средней за месяц температуре воздуха с сентября предшествующего по август текущего года по ГЛПР. В результате была уста-

новлена тесная взаимосвязь ширины годичного кольца с температурой воздуха мая — июля на всех объектах, подтвержденная значениями коэффициента корреляции между рассматриваемыми показателями (рис. 4). Эта связь оказалась стабильной во времени. Влияние количества осадков мая — июля было нестабильным и несущественным. В условиях Восточного Казахстана (ГЛПР «Семей орманы») наибольшая корреляционная связь годичного прироста сосны отмечена для температуры воздуха мая — июля.

Установлена общая тенденция увеличения влияния температуры воздуха и количества осадков конца вегетационного периода предшествующего года (август — сентябрь) в течение последних 15–20 лет на годичный прирост сосны в условиях Восточного Казахстана (рис. 5).

## Выводы

По данным проведенного дендроклиматологического анализа древесно-кольцевой хронологии сосны, произрастающей в сухих лесорастительных условиях ленточных боров Прииртышья (Восточный регион Казахстана), установлено, что на ширину годичного кольца максимально влияет температура воздуха и минимально — количество осадков.

В условиях ленточных боров Прииртышья, в большей степени, ширину годичного кольца определяет вторая половина вегетационного сезона (июнь — июль). Жаркий июнь и июль отрицательно влияют на радиальный прирост сосны обыкновенной, а осадки, наоборот способствуют формированию более широких годичных колец. При этом основной вклад в изменчивость ширины годичного кольца вносит именно температура воздуха.

За последние 50 лет отмечается снижение влияния температуры воздуха мая текущего года на радиальный прирост сосны, произрастающей в сухих лесорастительных условиях исследуемого региона, и увеличение влияния температуры воздуха июля.

Выявленная связь количества осадков июня — июля текущего года с годичным приростом сосны в сухих условиях произрастания Северного Казахстана не стабильна во времени. При этом полученная тесная взаимосвязь количества осадков мая с радиальным приростом сосны, которая отмечается в середине прошлого столетия (1952–1962 гг.), резко снижается на протяжении последующих 50 лет.

Наблюдается общая тенденция увеличения влияния температуры воздуха (август — сентябрь) и количества осадков (август) конца вегетационного сезона предшествующего года в течение последних 15–20 лет на радиальный прирост сосны обыкновенной.

*Работа выполнена в рамках бюджетной программы 217 «Развитие науки» подпрограммы 102 «Грантовое финансирование научных исследований» Министерства образования и науки Республики Казахстан по гранту № AP05131107 «Исследование климатогенной и антропогенной динамики сосновых боров Казахстана методами дендрохронологии».*

## Список литературы

- [1] Муратова Е.Н., Шиятов С.Г., Залесов С.В., Мочалов С.А. Междунар. конф. «Влияние изменения климата на бореальные и умеренные леса» (Россия, Екатеринбург, 5–10 июня 2006 г.) // Лесоведение, 2007. № 1. С. 74–76.
- [2] Мазепа В.С., Дэви Н.М. Образование многостольных жизненных форм деревьев лиственницы сибирской в экотоне верхней границы леса на Полярном Урале как индикатор изменения климата // Экология, 2007. № 6. С. 471–475.
- [3] Матвеев С.М. Дендроиндикация динамики состояния сосновых насаждений Центральной лесостепи. Воронеж: ВГУ, 2003. 272 с.
- [4] Данчева А.В., Залесов С.В. Экологический мониторинг лесных насаждений рекреационного назначения. Екатеринбург: УГЛТУ, 2015. 152 с.
- [5] Шиятов С.Г., Ваганов Е.А., Кирдянов А.В., Круглов В.Б., Мазепа В.С., Наурызбаев М.М., Хантемиров Р.М. Методы дендрохронологии. Часть I. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации. Красноярск: КрасГУ, 2000. 80 с.
- [6] Rinn F. TSAP Time Series Analysis and Presentation. Version 3.0. Reference Manual. Heidelberg, 1996, p. 262.
- [7] Holmes R.L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement // Tree-Ring Bulletin, 1983, v. 43, pp. 69–78.
- [8] Cook E., Holmes R. Guide for Computer Program AR-STAN, Adapted from Users Manual for Program AR-STAN. Laboratory of Tree-Ring Research. University of Arizona, 1986, pp. 50–65.
- [9] Cook E., Holmes R. Guide for Computer Program AR-STAN, Adapted from Users Manual for Program AR-STAN. Laboratory of Tree-Ring Research. University of Arizona, 1986, pp. 50–65.
- [10] Шиятов С.Г. Дендрохронология верхней границы леса на Урале. М.: Наука, 1986. 136 с.
- [11] Гусев А.В., Залесов С.В., Сарсекова Д.Н. Методика определения перспективности интродукции древесных растений // Материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. «Социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса в рамках концепции 2020» (Екатеринбург, УГЛТУ, 01 января–31 декабря 2009 г.). Екатеринбург: УГЛТУ, 2009. Ч. 2. С. 271–275.
- [12] Бочкарев Ю.Н. Изучение внутривековой динамики ландшафтов северной тайги Западной Сибири методами дендрохронологии // Вестник Московского университета, 2006. Сер. 5. География. № 3. С. 62–67.
- [13] Румянцев Д.Е. Диагностика особенностей роста сосны и ели в южной Карелии с использованием методов дендрохронологии: автореф. дис. ... биол. наук. М.: МГУЛ, 2004. 22 с.
- [14] Datsenko N.M., Sonechkin D.M., Yang B. Solving an eigen problem to create reliable tree-ring chronologies // Журнал Сибирского федерального университета. Сер. Биология. 2013. Т. 6. № 3. С. 257–274.
- [15] Шиятов С.Г. Дендрохронология верхней границы леса на Урале. М.: Наука, 1986. 136 с.

- [16] Румянцев Д.Е. История и методология лесоводственной дендрохронологии. М.: МГУЛ, 2010. 109 с.
- [17] Панов В.И. Связь дендрохронологии с крупными биосферными явлениями (на примере изменений ширины годичных древесных колец хвойных растений после извержений вулканов) // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Сер. Естественные и технические науки, 2015. № 7–8. С. 45–55.
- [18] Вахнина И.Л. Анализ динамики ширины годичных колец сосны обыкновенной в условиях восточного Забайкалья // Изв. Иркутск. гос. ун-та. Сер. Биология. Экология. 2011. Т. 4. № 3. С. 13–17.
- [19] Волков Ю.В., Тартаковский В.А. Математическая модель микроструктуры годичных слоев деревьев // Изв. Томск. политехн. ун-та, 2009. Т. 314. № 5. С. 117–120.
- [20] Бенькова А.В., Тарасова В.В., Шишкин А.В. Применение дендрохронологического метода для изучения особенностей роста естественных и искусственных лесных насаждений // Лесоведение, 2006. № 2. С. 3–8.
- [21] Колесников Б.П., Зубарева Р.С., Смолоногов Е.П. Лесорастительные условия и типы лесов Свердловской области. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1974. 177 с.

## Сведения об авторах

**Данчева Анастасия Васильевна** — канд. с.-х. наук, нач. отдела ТОО «Казахский научно-исследовательский институт лесного хозяйства и агролесомелиорации», a.dancheva@mail.ru

**Залесов Сергей Вениаминович** — д-р с.-х. наук, проректор по науке ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», Zalesov@usfeu.ru

**Муканов Булат Мажитович** — д-р с.-х. наук, профессор, зам. ген. директора по внедрению ТОО «Казахский научно-исследовательский институт лесного хозяйства и агролесомелиорации».

Поступила в редакцию 23.12.2019.

Принята к публикации 21.01.2020.

## CLIMATIC FACTORS INFLUENCE ON RADIAL PINE GROWTH IN RIBBON PINE FORESTS IN THE IRTYSH LAND

A.V. Dancheva<sup>1</sup>, S.V. Zalesov<sup>2</sup>, B.M. Mukanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kazakh Scientific Research Institute of Forestry and Agroforestry (KazSRIFA), 58, Kirov st., 021704, Shchuchinsk, Republic of Kazakhstan

<sup>2</sup>Ural State Forest Engineering University (USFEU), 37, Sibirsky tract st., 620100, Ekaterinburg, Russia

a.dancheva@mail.ru

The article presents the results of a dendroclimatological study of the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) annual rings, which grows in the conditions of the ribbon pine forests in the Irtysh region (Eastern part of Kazakhstan). The main causes of the climatic condition for the pine radial growth seasonal variability are considered. It has been established that the atmospheric temperature mainly affects the annual ring width while the amount of precipitation affects it least. A close dependence of the pine radial growth on the amount of precipitation, noted in the middle of the twentieth century (1952–1962), declined sharply over the next 50 years. The general tendency has been established that the air temperature (August - September) and rainfall (August) at the end of the growing season of the previous year have increasingly affected the radial growth of Scots pine over the past 15–20 years.

**Keywords:** pine stands, radial growth, climatic factors, dendroclimatology

**Suggested citation:** Dancheva A.V., Zalesov S.V., Mukanov B.M. *Vliyaniye klimaticheskikh faktorov na radial'nyy prirost sosny v lentochnykh borakh Priirtysh'ya* [Climatic factors influence on radial pine growth in ribbon pine forests in the Irtysh land]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 2, pp. 5–10.  
DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-5-10

## References

- [1] Muratova E.N., Shiyatov S.G., Zalesov S.V., Mochalov S.A. *Mezhdunarodnaya konferentsiya «Vliyaniye izmeneniya klimata na boreal'nye i umerennye lesa» Rossiya, Ekaterinburg, 5–10 iyunya 2006 g.* [International Conference «The Impact of Climate Change on Boreal and Temperate Forests» Russia, Yekaterinburg, June 5–10, 2006]. *Lesovedenie [Forest Science]*, 2007, no. 1, pp. 74–76.
- [2] Mazepa V.S., Devi N.M. *Obrazovanie mnogostvol'nykh zhiznennykh form derev'ev listvennitsy sibirskoy v ekotone verkhney granitsy lesa na Polyarnom Urale kak indikator izmeneniya klimata* [The formation of multi-stemmed life forms of Siberian larch trees in the ecotone of the upper forest border in the Polar Urals as an indicator of climate change]. *Ekologiya [Ecology]*, 2007, no. 6, pp. 471–475.
- [3] Matveev S.M. *Dendroindikatsiya dinamiki sostoyaniya sosnovykh nasazhdeniy Tsentral'noy lesostepi* [Dendroindication of the dynamics of the state of pine plantations of the Central forest-steppe]. Voronezh: Voronezh State University, 2003, 272 p.

- [4] Dancheva A.V., Zalesov S.V. *Ekologicheskiy monitoring lesnykh nasazhdeniy rekreatsionnogo naznacheniya* [Ecological monitoring of recreational forest plantations]. Yekaterinburg: Ural State Technical University, 2015, 152 p.
- [5] Shiyatov S.G., Vaganov E.A., Kiryanov A.V., Kruglov V.B., Mazepa V.S., Naurzbaev M.M., Khantemirov R.M. *Metody dendrokronologii. Chast' I. Osnovy dendrokronologii. Sbor i poluchenie drevnesno-kol'tsevoy informatsii* [Methods of dendrochronology. Part I. Fundamentals of Dendrochronology. Collection and receipt of tree-ring information]. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State University, 2000, 80 p.
- [6] Rinn F. TSAP Time Series Analysis and Presentation. Version 3.0. Reference Manual. Heidelberg, 1996, p. 262.
- [7] Holmes R.L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement // *Tree-Ring Bulletin*, 1983, v. 43, pp. 69–78.
- [8] Cook E., Holmes R. Guide for Computer Program ARSTAN, Adapted from Users Manual for Program ARSTAN. Laboratory of Tree-Ring Research. University of Arizona, 1986, pp. 50–65.
- [9] Cook E., Holmes R. Guide for Computer Program ARSTAN, Adapted from Users Manual for Program ARSTAN. Laboratory of Tree-Ring Research. University of Arizona, 1986, pp. 50–65.
- [10] Shiyatov S.G. *Dendrokronologiya verkhney granitsy lesa na Urale* [Dendrochronology of the upper border of the forest in the Urals]. Moscow: Nauka, 1986, 136 p.
- [11] Gusev A.V., Zalesov S.V., Sarsekova D.N. *Metodika opredeleniya perspektivnosti introduksii drevesnykh rasteniy* [Methods for determining the prospects of introduction of woody plants] *Materialy VII mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sotsial'no-ekonomicheskie i ekologicheskie problemy lesnogo kompleksa v ramkakh kontseptsii 2020», Ekaterinburg, UGLTU, 01 yanvarya–31 dekabrya 2009 g.* [Proceedings of the VII International Scientific and Technical Conference «Socio-economic and environmental problems of the forest complex in the framework of the concept 2020», Yekaterinburg, UGLTU, January 1 to December 31, 2009]. Ekaterinburg: UGLTU, 2009, part. 2, pp. 271–275.
- [12] Bochkarev Yu.N. *Izucheniye vnutrivkovoy dinamiki landshaftov severnoy taygi zapadnoy sibiri metodami dendrokronologii* [The study of the centuries-old dynamics of the landscapes of the northern taiga of western Siberia by the methods of dendrochronology]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5: Geografiya* [Moscow University Physics Bulletin. Ser. 5: Geography], 2006, no. 3, pp. 62–67.
- [13] Rumyantsev D.E. *Diagnostika osobennostey rosta sosny i eli v yuzhnoy Karelii s ispol'zovaniem metodov dendrokronologii* [Diagnosis of the features of pine and spruce growth in southern Karelia using dendrochronology methods]. Diss. Sci. (Biol.). Moscow: MGUL, 2004, 22 p.
- [14] Datsenko N.M., Sonechkin D.M., Yang B. Solving an eigen problem to create reliable tree-ring chronologies. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Biologiya* [Journal of the Siberian Federal University. Series: Biology], 2013, v. 6, no. 3, pp. 257–274.
- [15] Shiyatov S.G. *Dendrokronologiya verkhney granitsy lesa na Urale* [Dendrochronology of the upper border of the forest in the Urals]. Moscow: Nauka, 1986, 136 p.
- [16] Rumyantsev D.E. *Istoriya i metodologiya lesovodstvennoy dendrokronologii* [History and methodology of forestry dendrochronology]. Moscow: MGUL, 2010, 109 p.
- [17] Panov V.I. *Svyaz' dendrokronologii s krupnymi biosfernymi yavleniyami (na primere izmeneniy shiriny godichnykh drevesnykh kolets khvoynykh rasteniy posle izverzheniy vulkanov)* [The connection of dendrochronology with large biosphere phenomena (on the example of changes in the width of annual tree rings of conifers after volcanic eruptions)]. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. Series: Natural and Technical Sciences], 2015, no. 7–8, pp. 45–55.
- [18] Vakhnina I.L. *Analiz dinamiki shiriny godichnykh kolets sosny obyknovennoy v usloviyakh vostochnogo Zabaykal'ya* [Analysis of the dynamics of the width of annual rings of Scots pine in the conditions of eastern Transbaikalia] *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Biologiya. Ekologiya* [Bulletin of the Irkutsk State University. Series: Biology. Ecology]. 2011, v. 4, no. 3, pp. 13–17.
- [19] Volkov Yu.V., Tartakovskiy V.A. *Matematicheskaya model' mikrostruktury godichnykh sloev derev'ev* [A mathematical model of the microstructure of tree annual layers] *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University], 2009, v. 314, no. 5, pp. 117–120.
- [20] Ben'kova A.V., Tarasova V.V., Shishkin A.V. *Primeneniye dendrokronologicheskogo metoda dlya izucheniya osobennostey rosta estestvennykh i iskusstvennykh lesnykh nasazhdeniy* [The use of the dendrochronological method for studying the growth characteristics of natural and artificial forest plantations]. *Lesovedeniye* [Forestry], 2006, no. 2, pp. 3–8.
- [21] Kolesnikov B.P., Zubareva R.S., Smolonogov E.P. *Lesorastitel'nye usloviya i tipy lesov Sverdlovskoy oblasti* [Forest conditions and types of forests in the Sverdlovsk region]. Sverdlovsk: UC USSR Academy of Sciences, 1974, 177 p.

## Authors' information

**Dancheva Anastasiya Vasil'evna** — Cand. Sci. (Agriculture), Head of Department «Kazakh research Institute of forestry and agroforestry», a.dancheva@mail.ru

**Zalesov Sergey Veniaminovich** — Dr. Sci. (Agriculture), Vice-rector for science of the «Ural state forest engineering University», Zalesov@usfeu.ru

**Mukanov Bulat Mazhitovich** — Dr. Sci. (Agriculture), Professor of the «Kazakh research Institute of forestry and agroforestry»

Received 23.12.2019.

Accepted for publication 21.01.2020.

## ДИНАМИКА РОСТА ЛИСТВЕННИЧНО-ЕЛОВЫХ ЛЕСНЫХ КУЛЬТУР К.Ф. ТЮРМЕРА

М.Д. Мерзленко<sup>1</sup>, П.Г. Мельник<sup>1, 2</sup>, А.Н. Маликов<sup>1, 3</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лесоведения РАН (ИЛАН РАН), 140030, Московская обл., Одинцовский р-н, с. Успенское, ул. Советская, 21

<sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

<sup>3</sup>«Центрлеспроект», Филиал ФГБУ «Рослесинфорг», 141280, Московская обл., г. Ивантеевка, ул. Заводская, д. 10

md.merzlenko@mail.ru

Приведены результаты многолетнего опыта выращивания смешанных лесных культур из лиственницы европейской и ели европейской в западном Подмосковье, в насаждении, созданном в 1863 г. лесоводом-классиком Карлом Францевичем Тюрмером на территории Порецкой лесной дачи графа Алексея Сергеевича Уварова. Изучением хода роста в этом долговременном опыте регулярно занимались лесоводы разных поколений. В настоящее время искусственный древостой перешагнул полутораветковой рубеж. Ввиду изначально большого размера постоянной пробной площади проанализированы изменения в распределении деревьев лиственницы европейской по ступеням толщины за последние 48 лет. В древостое просматривается наличие очень крупных стволов деревьев толщиной в 130-летних культурах до 76 см, а в 158-летних — 88 см. Исследования показали возможность достижения этими лесными культурами к возрасту спелости очень высоких запасов стволовой древесины — свыше 1300 м<sup>3</sup>/га, не считая поступлений от рубок промежуточного пользования. Ель европейская изначально отставала в росте по высоте от лиственницы европейской. Однако в отличие от ели второго яруса, рост по высоте ели первого яруса был стабильно синхронен (особенно в возрасте 50–110 лет) по отношению к пологу лиственницы. Как компонент искусственного дендроценоза, ель положительно укрепляет вертикальный профиль насаждения. Показано, что лиственница европейская в сочетании с елью европейской формирует долговечные искусственные древостой, однако вследствие очень больших высот деревьев лиственницы (высота отдельных экземпляров в 158 лет достигает 48 м) они подвержены вывалам ураганными ветрами.

**Ключевые слова:** лиственница европейская (*Larix decidua* Mill.), ель европейская, тип лесных культур, динамика роста, лесоводственный эффект, интродукция, Карл Францевич Тюрмер

**Ссылка для цитирования:** Мерзленко М.Д., Мельник П.Г., Маликов А.Н. Динамика роста лиственнично-еловых лесных культур К.Ф. Тюрмера // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 2. С. 11–16. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-11-16

Целесообразность интродукции лиственницы в Центральную Россию для целевого лесовосстановления уже давно обстоятельно доказана многими исследователями [1–8]. В настоящий момент настало время подвести итог многолетнему опыту выращивания лесных культур лиственницы. Большую ценность представляют созданные во второй половине XIX в. и сохранившиеся донныне лиственничные культуры лесовода-классика К.Ф. Тюрмера [9]. Он вырастил лиственницу европейскую (*Larix decidua* Mill.) с различным размещением посадочных мест и в сочетании с другими хвойными породами. Наиболее успешной сопутствующей породой в лиственничных насаждениях, по мнению В.П. Тимофеева [6], зарекомендовала себя ель европейская (*Picea abies* L.). Результаты изучения этого бесценного долговременного опыта позволят в будущем подходить с профессиональных позиций к проектированию, созданию и выращиванию устойчивых и высокопродуктивных насаждений, отвечающих ведению многоцелевого лесного хозяйства.

### Цель работы

Цель работы — анализ динамики роста и производительности лиственнично-еловых лесных

культур вплоть до фазы спелости и начала фазы распада [10], т. е. подведение итога выращивания культур в данном смешении.

### Объект и методы исследований

Объектом исследований является лиственнично-еловое искусственное насаждение в кв. 214 Порецкого участкового лесничества Московской обл. на постоянной пробной площади (ППП) 4Т. Искусственное насаждение представляет собой смешанные лесные культуры из лиственницы и ели, созданные лесоводом К.Ф. Тюрмером в 1863 г. путем посадки двухлетних сеянцев лиственницы европейской судетского происхождения и трехлетних сеянцев местной ели европейской. Тип лесных культур: порядное смешение лиственницы и ели; расстояние между рядами 2,13 м (сажень); шаг посадки в рядах лиственницы 1,42 м (два аршина), в рядах ели 0,71 м (аршин). Таким образом, на 1 га было высажено 1650 экз. лиственницы и 3300 экз. ели. Лесные культуры произрастают в типичных условиях ельников кисличных. Тип леса — листвяг-кисличник.

В основу методов исследований лиственнично-еловых лесных культур положены принятые в лесоводстве и лесной таксации приемы изучения насаждений [11, 12].

**Таксационная характеристика лиственнично-еловых лесных культур  
на постоянной пробной площади 4Т в диапазоне биологического возраста  
лиственницы европейской с 70 по 158 лет**

**Taxation characteristics of larch-spruce forest crops on a constant test area 4T in the range  
of biologically aged European larch from 70 to 158 years old**

Год перечета, автор	Биологический возраст, лет	Ярус	Состав	Средние		N, шт/га	G, м <sup>2</sup> /га	M, м <sup>3</sup> /га	V <sub>сп</sub> , м <sup>3</sup>
				H <sub>ср</sub> , м	D <sub>1,3</sub> , см				
1931 г., Е.Н. Елфимова	70	1-й	10Л	29,4	25,1	714	33,5	458	0,64 0,22
	71	2-й	10Е	16,4	18,8	564	15,6	122	
					Итого:	1278	49,1	580	
1947 г., Х.М. Исаченко	86	1-й	10Л	32,6	32,4	660	54,4	636	0,83 0,30
	87	2-й	10Е	17,0	19,2	442	12,8	134	
					Итого:	1102	67,2	770	
1960 г., В.П. Тимофеев, В.В. Надеждин	99	1-й	10Л	37,0	38,0	494	54,8	886	1,85 0,38
	100	2-й	10Е	21,0	22,0	141	5,4	54	
					Итого:	645	60,2	940	
1971 г., А.Н. Поляков	110	1-й	10Л	38,9	41,0	470	62,2	1010	2,15 0,93
	111	2-й	10Е	30,7	29,7	40	2,7	37	
					Итого:	510	64,9	1047	
1991 г., М.Д. Мерзленко	130	1-й	10Л	40,8	48,2	378	69,0	1211	3,20 0,48
	131	2-й	10Е	22,7	23,6	134	5,9	64	
					Итого:	512	74,9	1275	
1997 г., М.Д. Мерзленко	136	1-й	10Л	41,5	51,2	358	75,6	1316	3,68 0,16
	137	2-й	10Е	14,9	16,5	171	3,7	28	
					Итого:	529	79,3	1344	
2004 г., М.В. Рубцов и др.	143	1-й	10Л	43,3	53,4	325	72,8	1318	4,06 0,23
	82...144	2-й	10Е	15,9	18,2	136	3,5	31	
					Итого:	461	76,3	1349	
2019 г., М.Д. Мерзленко и др.	158	1-й	10Л	45,0	56,9	275	69,9	1296	4,71 2,00 0,19
	159	1-й	10Е	34,8	39,8	16	2,0	32	
	97...159	2-й	10Е	17,1	16,9	209	4,7	40	
					Итого:	500	76,6	1362	

## Результаты и обсуждение

Этот бесценный объект долговременных наблюдений всегда привлекал внимание многих поколений лесоводов. В разные годы его изучали ученые Е.Н. Елфимова [13], Х.М. Исаченко, Я.Я. Васильев [3] и научные коллективы под руководством В.П. Тимофеева [6], А.Н. Полякова [14], М.В. Рубцова [15] и М.Д. Мерзленко [16]. Первые сведения о росте лиственнично-еловых лесных культур были опубликованы Е.Н. Елфимовой в 1938 г. К 68-летнему возрасту посадки представляли двухъярусное насаждение с лиственницей в первом ярусе и елью во втором (отдельные ели входили в верхний ярус) [13]. Приведем таксационную характеристику:

*Для лиственничной части:*

Высота, м ..... 29,4

Средний диаметр, см ..... 25,1

Запас, м<sup>3</sup>/га ..... 458

Средний прирост, м<sup>3</sup> ..... 6,6

*Для еловой части:*

Средняя высота, м ..... 16,4

Средний диаметр, см ..... 18,8

Запас, м<sup>3</sup>/га ..... 122

Средний прирост м<sup>3</sup> ..... 1,9

Я.Я. Васильев, исследуя особенности роста лиственницы в смешанных посадках, показал, что в насаждениях лиственницы с елью лиственница с первых лет совместного произрастания обгоняет по высоте и диаметру ель, задерживает ее рост и осаживает во II ярус, сама же растет с замедленной дифференциацией деревьев и с большим количеством деревьев низших классов роста (III–IV), поэтому средний диаметр у нее меньше, чем в насаждениях с сосной, но запас больше за счет большего количества сохранившихся деревьев лиственницы и особенно ели [3]. В 1960 г. объект был обследован В.В. Надеждиным, учеником профессора В.П. Тимофеева. В 99-летнем возрасте лиственницы культуры росли по Ia классу бонитета, средняя высота лиственницы составила 37,0 м, ели — 21,0 м; средний диаметр соответственно 38,0 и 22,0 см. Запас стволовой древесины лиственницы — 886 м<sup>3</sup>/га; общий запас древесины — 940 м<sup>3</sup>/га. В 1963 г. в насаждении была заложена ППП [6]. В 1993 г. по заданию Рослесхоза коллектив ученых под руководством чл.-корр. ВАСХНИЛ профессора М.В. Рубцова детально обследовал этот объект наряду с другими участками лесных культур

в возрасте 80 лет и старше, общий запас лиственнично-еловых культур превысил 1300 м<sup>3</sup>/га [15].

Весной 2019 г. нами были проведены очередные исследования данного объекта в 158-летнем возрасте лиственницы. Таблица отражает динамику роста и производительности лиственнично-еловых культур. Лиственница характеризуется очень хорошим ростом как по высоте, так и по диаметру. При этом ее рост в IV и V классах возраста соответствует Ia классу бонитета, а затем Ib классу бонитета.

В связи с изначально большой площадью ППП 4Т — 0,55 га нами проанализированы изменения в распределении деревьев лиственницы европейской по ступеням толщины за последние 48 лет (рис. 1). Как видно из рис. 1, пик численности согласно кривой распределения в 1971 г., т. е. в возрасте 110 лет, был сдвинут в сторону меньших значений ступеней толщины. Далее в 130 лет, а тем более в 158 лет кривая распределения стала плавнее и приблизилась по форме к кривой нормального распределения. При этом четко просматривается наличие очень крупных стволов деревьев. Максимальная ступень толщины в 130-летних культурах составила 76 см, а в 158-летних — 88 см.

С увеличением возраста лиственницы со 110 лет к 158 годам в разрезе ступеней толщины происходит увеличение дифференциации стволов. Так, диапазон разбега диаметров от самой маленькой ступени к самой большой составил в 110 лет 40 см, в 130 — 52 см, в 158 лет — 60 см.

Характерной особенностью лиственнично-еловых культур является лидирующее преимущество лиственницы не только по значениям средних высот и диаметров, но и особенно по запасам стволовой древесины (см. таблицу). Максимальный запас у лиственницы, как основного компонента искусственного насаждения, был зафиксирован в возрасте 143 года и составил 1318 м<sup>3</sup>/га. В ходе санитарных рубок удалялась в основном ель, она же была значительно вырублена в годы Великой Отечественной войны. Несмотря на это нам удалось по модельным деревьям, взятым не только на ППП 4Т, но и еще на двух других участках лиственнично-еловых культур, восстановить картину динамики роста по высоте лиственницы и ели (рис. 2). При этом следует отметить, что еще ранее [5, 14, 16] приводилась динамика роста лиственницы по высоте, но, как правило, она касалась лиственнично-сосново-еловых культур. Приведенная на рис. 2 динамика роста лиственнично-еловых культур, применительно к еловому компоненту разделена на ярусы, причем 2-й ярус ели сложен из отставших в росте деревьев от посадки 1863 г. плюс главным образом от ели естественного возобновления.

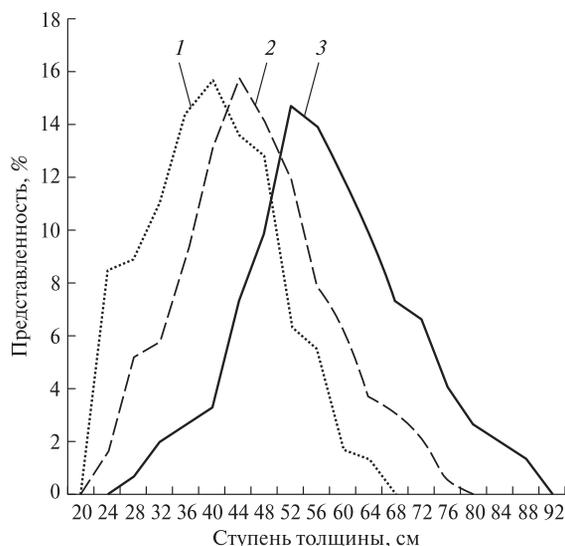


Рис. 1. Распределение деревьев лиственницы по ступеням толщины: 1 — 1971 г., 110 лет; 2 — 1991 г., 130 лет; 3 — 2019 г., 158 лет

Fig. 1. The distribution of larch trees in diameter class: 1 — 1971, 110 years; 2 — 1991, 130 years old; 3 — 2019, 158 years old

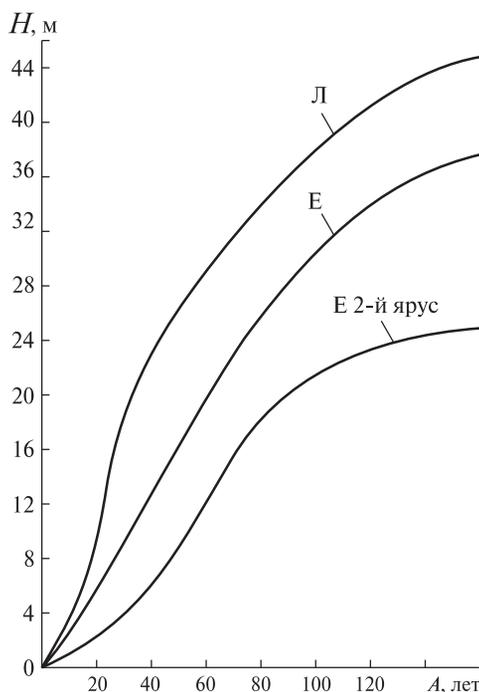


Рис. 2. Ход роста компонентных пород в лиственнично-еловых культурах К.Ф. Тюрмера: Л — лиственница; Е — ель

Fig. 2. The growth of component species in larch-spruce crops K.F. Tyurmer: Л — larch; Е — spruce

Как видно из рис. 2, ель изначально отставала в росте от лиственницы европейской. Однако в отличие от ели 2-го яруса рост по высоте у ели 1-го яруса был стабильно синхронен (особенно в возрасте 50...110 лет) по отношению к пологу лиственницы. В целом ель, как компонент



Рис. 3. Отпад деревьев лиственницы европейской на ППП 4Т  
Fig. 3. The decline of European larch trees at the 4T RFP

искусственного дендроценоза, положительно укрепляла вертикальный профиль насаждения. Аналогичные результаты получены в спелых лиственнично-еловых культурах в лесничестве «Загон» Новодугинского р-на Смоленской обл. Вследствие сочетания лиственницы в 1-м ярусе и ели во 2-м в VI классе возраста насаждения дают запас древесины на 1 га от 895 до 1155 м<sup>3</sup>. На всех объектах лиственница растет по Ia–Iб классам бонитета [17]. Перспективность смешения лиственницы с елью подтверждается и на объекте географических культур в Бронницком лесничестве Московской обл., созданных лесничим П.И. Дементьевым под руководством профессора В.П. Тимофеева в 1954–1955 гг. В средневозрастных лесных культурах, практически во всех вариантах наиболее продуктивны смешанные насаждения лиственницы с елью [18, 19], однако у быстрорастущих экотипов лиственницы европейской лидерами по запасу являются чистые культуры [18, 20].

За последние 15 лет на ППП 4Т произошло снижение текущего прироста как по высоте насаждения лиственницы, так и по диаметру, причем по среднему диаметру очень существенно: по сравнению с периодом 1997–2004 гг. — в 4,4 раза. Текущий прирост по запасу стволовой древесины за последние 15 лет стал отрицательным (–1,47 м<sup>3</sup>/год). Все это свидетельствует о том, что данное искусственное насаждение лиственницы вступило в фазу распада [10], что наглядно показано на фото (рис. 3), где видны выпавшие деревья и окно на территории ППП 4Т.

Отпад деревьев лиственницы идет как по низовому, так и по верховому характеру. Последний происходит при сильных и ураганных ветрах, вызывающих вывал хорошо развитых, но более высоких деревьев. Этому процессу способствует негативная деятельность трутовика Швейница (*Phaeolus schweinitzii*), когда у пораженных им деревьев загнивает корневая система.

### Выводы

1. Тип лиственнично-еловых лесных культур с пониженной густотой посадки способствует формированию высокопроизводительных насаждений, достигающих запаса стволовой древесины свыше 1300 м<sup>3</sup>/га.

2. Ель с лесоводственных позиций в лиственнично-еловом искусственном дендроценозе выполняет положительную функцию.

3. Назначать в рубку лесные культуры из лиственницы европейской следует в возрасте 121...140 лет, не дожидаясь естественной спелости, т. е. фазы распада насаждения.

### Список литературы

- [1] Яблоков А.С. Культура лиственницы и уход за насаждениями. М.: Гослестехиздат, 1934. 128 с.
- [2] Тимофеев В.П. Лиственница в культуре. М.-Л.: Гослестехиздат, 1947. 296 с.
- [3] Васильев Я.Я. Насаждения европейской лиственницы в Поречье Уваровского района Московской области // Тр. Ботанического института им. В.Л. Комарова АН СССР. Сер. 4. Вып. 1. 1950. С. 59–78.
- [4] Тимофеев В.П. Роль лиственницы в поднятии продуктивности лесов. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 160 с.
- [5] Рубцов М.В., Мерзленко М.Д. Лесные культуры К.Ф. Тюрмера. М.: ЦБНТИлесхоз, 1975. 42 с.
- [6] Тимофеев В.П. Лесные культуры лиственницы. М.: Лесная пром-сть, 1977. 216 с.
- [7] Писаренко А.И., Мерзленко М.Д. Создание искусственных лесов. М.: Агропромиздат, 1990. 270 с.
- [8] Мерзленко М.Д., Коженкова А.А. Интродукция лиственницы европейской в Поречье // Науч. тр. МГУЛ, 1994. Вып. 275. С. 86–95.
- [9] Thürmer K. Bewirtschaftung der Privatwäldungen // Allgemeine Forst und Jagzeitung, November, 1877, pp. 385–391.
- [10] Мерзленко М.Д., Бабич Н.А. Теория и практика искусственного лесовосстановления. Архангельск: САФУ, 2011. 239 с.

- [11] Родин А.Р., Мерзленко М.Д. Методические рекомендации по изучению лесных культур старших возрастов. М.: ВАСХНИЛ, 1983. 36 с.
- [12] Чернов Н.Н., Соловьев В.М., Нагимов З.Я. Методические основы лесокультурных исследований. Екатеринбург: УГЛТУ, 2012. 422 с.
- [13] Елфимова Е.Н. Рост культуры в даче Поречье Уваровского лесхоза // Лесное хозяйство, 1938. № 6. С. 55–61.
- [14] Поляков А.Н., Ипатов Л.Ф., Успенский В.В. Продуктивность лесных культур. М.: Агропромиздат, 1986. 240 с.
- [15] Рубцов М.В., Мерзленко М.Д., Глазунов Ю.Б., Николаев Д.К. Лесоводственная экскурсия в тюрмеровские леса Поречья. М.: ИЛАН РАН, 1998. 35 с.
- [16] Мерзленко М.Д. Об эталонных культурах хвойных пород зоны смешанных лесов // Вестник сельскохозяйственной науки, 1978. № 6. С. 117–124.
- [17] Клычников А.М., Мельник П.Г., Байков А.А. Продуктивность лиственницы в лесничестве «Загон» // Леса Евразии — Белорусское Поозерье: Материалы XII Междунар. конф. молодых ученых, посвященной 145-летию со дня рождения профессора Г.Ф. Морозова. Нац. парк «Братиславские озера», 30 сентября – 6 октября 2012 г. М.: МГУЛ, 2012. С. 193–195.
- [18] Карасев Н.Н. Повышение продуктивности лесов Подмосковья путем интродукции лиственницы: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.03.01. М., 2009. 21 с.
- [19] Павловский Н.А., Мельник П.Г., Постников А.А. Продуктивность экотипов лиственницы в смешанных с елью насаждениях // Леса Евразии — Белорусское Поозерье: Материалы XII Междунар. конф. молодых ученых, посвященной 145-летию со дня рождения профессора Г.Ф. Морозова. Нац. парк «Братиславские озера», 30 сентября – 6 октября 2012 г. М.: МГУЛ, 2012. С. 193–195.
- [20] Мельник П.Г., Карасев Н.Н., Лещев Г.А. Популяционно-географическая изменчивость лиственницы в фазе приспешивания // Леса Евразии — Белорусское Поозерье: Материалы XII Междунар. конф. молодых ученых, посвященной 145-летию со дня рождения профессора Г.Ф. Морозова. Нац. парк «Братиславские озера», 30 сентября – 6 октября 2012 г. М., 2013. С. 189–191.

## Сведения об авторах

**Мерзленко Михаил Дмитриевич** — д-р с.-х. наук, профессор, гл. науч. сотр. ФГБУН Институт лесоведения РАН, md.merzlenko@mail.ru

**Мельник Петр Григорьевич** — канд. с.-х. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал); ст. науч. сотр. ФГБУН Институт лесоведения РАН, melnik\_petr@bk.ru

**Маликов Александр Николаевич** — аспирант, ФГБУН Институт лесоведения РАН, инженер-таксатор «Центрлеспроект», филиал ФГБУ «Рослесинфорг», klevenivo1988@mail.ru

Поступила в редакцию 12.12.2019.

Принята к публикации 23.01.2020.

## GROWTH DYNAMICS OF LARCH-SPRUCE MIXED STANDS ESTABLISHED BY K.F. TURMER

M.D. Merzlenko<sup>1</sup>, P.G. Melnik<sup>1,2</sup>, A.N. Malikov<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Forest Science Russian Academy of Sciences, 21, Sovetskaya st., 140030, Uspenskoe, Moscow reg., Russia

<sup>2</sup>BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

<sup>3</sup>«Roslesinform» «Tsentrlesprojekt», 10, Zavodskaya st., 141280, Ivanteevka, Moscow reg., Russia

md.merzlenko@mail.ru

The results of a long term experiment on the growth of European larch and European spruce mixed forests in the northern part of the Moscow region are presented in this article. The stand was established in 1863 by Karl Frantsevitch Turmer at the territory of Poretskaya Forest Estate that was owned by count Aleksei Sergejevitch Uvarov. Different generation of foresters observed the development of this experiment. Nowadays the stand is more than 150 years old. European Larch distribution was analysed within the last 48 years and according to different diameter classes. Such an analysis became possible due to the large area of the permanent sample plot. Large trees were observed in the stand. The maximum diameter at the age of 130 years is 76 cm. In the stands that are 158 years old the diameter is up to 88 cm. The research showed that this stands can reach rather high, more than 1300 m<sup>3</sup>/ha, stand volume excluding intermediate selection cuttings. The European Spruce initially showed poorer results in terms of height growth. However the spruce that made up the first growth level, especially at the age of 50–110 years, was synchronized with the larch canopy. Spruce improves vertical profile of such stands. The European Larch in combination with the European Spruce forms sustainable artificial stands. However and due to the height of some larch trees (up to 48 meters at the age of 158) they suffer from windfall.

**Keywords:** European Larch (*Larix decidua* Mill.), European Spruce, forest plantation type, growth dynamics, silvicultural effect, species introduction, Karl Frantsevitch Turmer

**Suggested citation:** Merzlenko M.D., Melnik P.G., Malikov A.N. *Dinamika rosta listvennichno-elovykh lesnykh kul'tur K.F. Tyurmera* [Growth dynamics of larch-spruce mixed stands established by K.F. Turmer]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 2, pp. 11–16. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-11-16

## References

- [1] Yablokov A.S. *Kul'tury listvennitsy i ukhod za nasazhdeniyami* [Larch cultures and planting care]. Moscow: Goslesbumizdat, 1934, 128 p.
- [2] Timofeev V.P. *Listvennitsa v kul'ture* [Larch in culture]. Moscow–Leningrad: Goslestechnizdat, 1947, 296 p.
- [3] Vasil'ev Ya.Ya. *Nasazhdeniya evropeyskoy listvennitsy v Porech'e Uvarovskogo rayona Moskovskoy oblasti* [Planting of European larch in Porechye, Uvarovsky District, Moscow Region]. *Trudy Botanicheskogo instituta im. V.L. Komarova AN SSSR* [Transactions of the Botanical Institute named after V.L. Komarov Academy of Sciences of the USSR], 1950, ser. 4, v. 1, pp. 59–78.
- [4] Timofeev V.P. *Rol' listvennitsy v podnyatii produktivnosti lesov* [The role of larch in raising forest productivity]. Moscow: AN SSSR, 1961, 160 p.
- [5] Rubtsov M.V., Merzlenko M.D. *Lesnye kul'tury K.F. Tyurmera* [Forest plantation K.F. Türmer]. Moscow: TsBNTIleskhov, 1975, 42 p.
- [6] Timofeev V.P. *Lesnye kul'tury listvennitsy* [Larch forest plantation]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest industry], 1977, 216 p.
- [7] Pisarenko A.I., Merzlenko M.D. *Sozdanie iskusstvennykh lesov* [Creation of artificial forests]. Moscow: Agropromizdat, 1990, 270 p.
- [8] Merzlenko M.D., Kozhenkova A.A. *Introduktsiya listvennitsy evropeyskoy v Porech'e* [Introduction of European larch in Porechye]. *Nauchnye trudy MSFU* [Scientific works of Moscow State Forest University], 1994, v. 275, pp. 86–95.
- [9] Thürmer K. *Bewirtschaftung der Privatwaldungen*. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*, November, 1877, pp. 385–391.
- [10] Merzlenko M.D., Babich N.A. *Teoriya i praktika iskusstvennogo lesovosstanovleniya* [Theory and practice of artificial reforestation]. Arkhangel'sk: SAFU, 2011, 239 p.
- [11] Rodin A.R., Merzlenko M.D. *Metodicheskie rekomendatsii po izucheniyu lesnykh kul'tur starshikh vozrastov* [Guidelines for the study of older forest crops]. Moscow: VASKhNIL, 1983, 36 p.
- [12] Chernov N.N., Solov'ev V.M., Nagimov Z.Ya. *Metodicheskie osnovy lesokul'turnykh issledovaniy* [Methodological foundations of forest culture research]. Ekaterinburg: UGLTU, 2012, 422 p.
- [13] Elfimova E.N. *Rost kul'tury v dache Porech'e Uvarovskogo leskhoza* [The growth of culture in the dacha Porechye of the Uvarov forestry]. *Lesnoe khozyaystvo* [Forestry], 1938, no. 6, pp. 55–61.
- [14] Polyakov A.N., Ipatov L.F., Uspenskiy V.V. *Produktivnost' lesnykh kul'tur* [Productivity of forest crops]. Moscow: Agropromizdat, 1986, 240 p.
- [15] Rubtsov M.V., Merzlenko M.D., Glazunov Yu.B., Nikolaev D.K. *Lesovodstvennaya ekskursiya v tyurmerovskie lesa Porech'ya* [Silvicultural excursion to the Türmer forests of Porechye]. Moscow: ILAN RAN, 1998, 35 p.
- [16] Merzlenko M.D. *Ob etalonnykh kul'turakh khvoynykh porod zony smeshannykh lesov* [About reference coniferous cultures of the mixed forest zone]. *Vestnik sel'skokhozyaystvennoy nauki* [Bulletin of Agricultural Science], 1978, no. 6, pp. 117–124.
- [17] Klychnikov A.M., Melnik P.G., Baikov A.A. *Produktivnost' listvennitsy v lesnichestve «Zagon»* [Larch productivity in «Zagon» forest district]. *Lesa Evrazii — Belorusskoe Poozer'e: Materialy XII Mezhdunarodnoy konferentsii molodykh uchenykh, posvyashchennoy 145-letiyu so dnya rozhdeniya professora G.F. Morozova* [Eurasian Forests — Belarusian Lake District (Belorusskoye Poozerie): Materials of the XII International Conference of Young Scientists, dedicated to 145th anniversary from the date of Prof. G.F. Morozov's birth]. Moscow: MGUL, 2012, pp. 168–170.
- [18] Karasev N.N. *Povyshenie produktivnosti lesov Podmoskov'ya putem introduktsii listvennitsy* [Increasing forest productivity in the Moscow Region by introducing larch]. *Diss. Sci. (Agric.) 06.03.01*. Moscow, 2009, 21 p.
- [19] Pavlovsky N.A., Melnik P.G., Postnikov A.A. *Produktivnost' ekotipov listvennitsy v smeshannykh s el'yu nasazhdeniyakh* [Productivity of ecotypes of larch in the stands mixed with spruce]. *Lesa Evrazii — Belorusskoe Poozer'e: Materialy XII Mezhdunarodnoy konferentsii molodykh uchenykh, posvyashchennoy 145-letiyu so dnya rozhdeniya professora G.F. Morozova* [Eurasian Forests — Belarusian Lake District (Belorusskoye Poozerie): Materials of the XII International Conference of Young Scientists, dedicated to 145th anniversary from the date of Prof. G.F. Morozov's birth]. Moscow: MGUL, 2012, pp. 193–195.
- [20] Melnik P.G., Karasev N.N., Leschev G.A. *Populyatsionno-geograficheskaya izmenchivost' listvennitsy v faze prispevaniya* [Population and geographical variability of the larch in the phase of prematurity]. *Lesa Evrazii — Belorusskoe Poozer'e: Materialy XII Mezhdunarodnoy konferentsii molodykh uchenykh, posvyashchennoy 145-letiyu so dnya rozhdeniya professora G.F. Morozova* [Eurasian Forests — Belarusian Lake District (Belorusskoye Poozerie): Materials of the XII International Conference of Young Scientists, dedicated to 145th anniversary from the date of Prof. G.F. Morozov's birth]. Moscow: MGUL, 2012, pp. 189–191.

## Authors' information

**Merzlenko Mikhail Dmitriyevich** — Dr. Sci. (Agricultural), Professor, Chief Scientist of the Institute of Forest Science Russian Academy of Sciences, md.merzlenko@mail.ru

**Melnik Petr Grigoryevich** — Cand. Sci. (Agricultural), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), Senior Staff Scientist, Institute of Forest Science Russian Academy of Sciences, melnik\_petr@bk.ru

**Malikov Aleksander Nikolaevich** — Pg., Institute of the Forest Science Russian Academy of Sciences, tax engineer of the «Tsentrlesprojekt» «Roslesinform», klevenivo1988@mail.ru

Received 12.12.2019.

Accepted for publication 23.01.2020.

## АНАЛИЗ И РЕСУРСНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ФЛОРЫ ОКРЕСТНОСТЕЙ КАРМАНОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН

Н.Н. Минина, Л.И. Гилимшина

ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет» (Бирский филиал), 452453, Башкортостан, г. Бирск, ул. Интернациональная, д. 10

mnn27@mail.ru

Представлены данные, полученные в результате изучения флоры окрестностей Кармановского водохранилища Республики Башкортостан. Установлено наличие 13 видов деревьев, 3 вида кустарников, 96 видов травянистых растений — всего 113 видов. Проведен систематический анализ, позволивший определить, что на изученной территории наиболее распространены семейства *Asteraceae*, *Fabaceae*, *Poaceae*, *Brassicaceae*, *Polygonaceae*. Отмечено, что по типам опыления преобладают энтомофильные (51 вид) и самоопыляющиеся растения (34 вида). Установлено преобладание светолюбивых (60 видов) и теневыносливых (49 видов) растений. Обнаружены тенелюбивые растения (4 вида). Определены группы таких растений, как светолюбивые *Betula pendula* Roth., *Larix sibirica* L., *Pinus silvestris* L., которые произрастают в разреженных посадках, тенелюбивые — *Acer negundo* L., *Tilia cordata* Mill. и травянистые растения степей — *Plantago major* L., *Phleum nodosum* L. Приведена ресурсная характеристика исследуемых видов растений. Перечислены лекарственные растения, встречающиеся в рассматриваемой флоре, например *Crataegus sanguinea*, *Quercus robur* L., *Viburnum opulus* L., *Tilia cordata* L., *Rubus idaeus* L., *Sorbus aucuparia* L., *Pinus sylvestris* L., *Padus avium* Mill., *Rosa majalis* Herrm., *Equisetum arvense* L., *Hypericum perforatum* L. и др.

**Ключевые слова:** флора, анализ флоры, систематический анализ, таксономический анализ, жизненные формы

**Ссылка для цитирования:** Минина Н.Н., Гилимшина Л.И. Анализ и ресурсная характеристика флоры окрестностей Кармановского водохранилища Республики Башкортостан // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 2. С. 17–22. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-17-22

Сохранение биологического разнообразия — одна из ключевых экологических задач, поставленных перед современным обществом. Важнейшей составляющей биоразнообразия является флора как совокупность видов растений, произрастающих на определенной территории. Флора служит основой формирования не только растительности, но и экосистемы в целом. В соответствии с известным экологическим принципом «разнообразие порождает разнообразие» флора предопределяет состав гетеротрофных компонентов экосистемы, поэтому ее изучение, рациональное использование и охрана признаны важнейшими составляющими широкой программы сохранения биоразнообразия как исчерпаемого ресурса [1].

Флора как совокупность видов конкретной территории формируется под влиянием естественных и антропогенных факторов. Изучение ее состава входит в комплекс задач экологического мониторинга [2].

Как правило, проводится исследование региональной флоры в границах административных единиц (республик, административных районов, городов или сельских населенных пунктов). Это — наиболее традиционный тип флористических исследований, позволяющий решать важнейшие задачи биомониторинга, в частности наблюдение за состоянием биологического разнообразия растений региона [3–5].

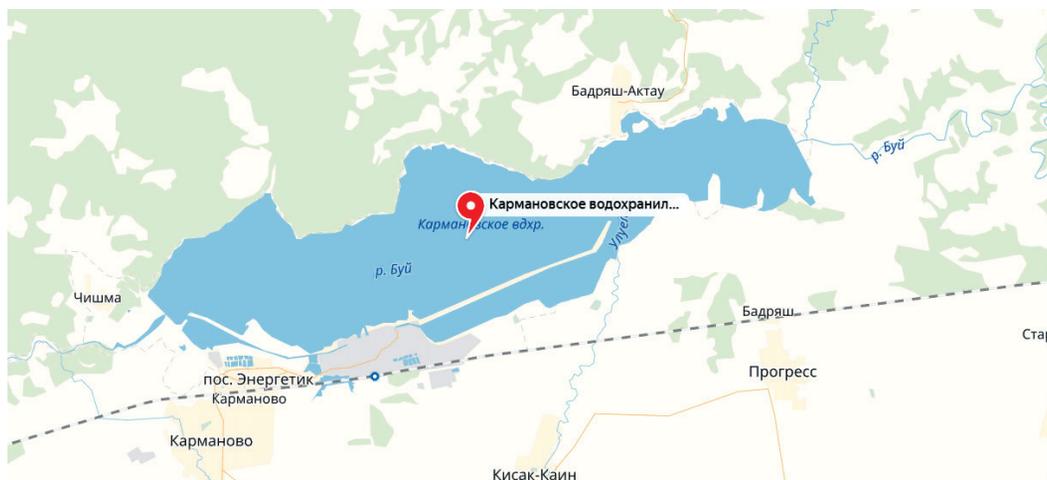
В результате изучения региональных флор появляется полный список видов растений с оценкой их распространения, что позволяет выявить редкие виды и составить местную «Красную книгу». Периодические повторные обследования дают возможность определить тенденцию изменения региональной флоры под влиянием факторов антропогенного характера, в первую очередь это адвентизация, т. е. увеличение доли заносных видов, и снижение флористического разнообразия [6].

Изучение региональных флор необходимо для понимания геоботанических особенностей и оценки ботанических ресурсов, а также для разработки системы охраны растительного биоразнообразия.

Решение указанных вопросов составляет фундаментальную комплексную задачу ботанической географии, для которого можно широко использовать методы флористики, фитоценологии, палеоботаники, экологии, биологии популяций, генетики, математики и информатики [7–20].

### Цель работы

Цель работы — изучение видового состава флоры окрестности Кармановского водохранилища Республики Башкортостан и анализ его особенностей.



Расположение Кармановского водохранилища [8]  
Location of the Karmanov reservoir [8]

## Материалы и методы исследования

Значимым и известным водохранилищем в Республике Башкортостан является Кармановское водохранилище, расположенное в пределах г. Нефтекамска на р. Буй (рисунок). Водохранилище ведет свою историю с 1963 г. и популярно по части рыболовства. Наличие большого количества рыбы в водохранилище объясняется ежегодным пополнением рыбзапасов в целях очистки воды для использования Кармановской ГРЭС [8, с 12].

Площадь Кармановского водохранилища составляет примерно 4 тыс. км<sup>2</sup>, длина — 15, ширина — 3,5 км (максимальная отметка), средняя глубина — 3,8 м. Есть участок, где глубина достигает 12 м [9]. В акватории водоема установлена дамба протяженностью около 3 тыс. м, из-за наличия которой всегда есть риск зарастания водоема. Во избежание этого, в него активно запускают мальков, иначе дно покроется слизью, препятствующей его прямому назначению. На дне водоема обнаружено множество ракушек, и вода в нем относительно теплая и чистая [10–15].

Для проведения исследования флоры окрестностей водохранилища был использован маршрутно-экскурсионный метод, изучался внешний вид растений. При описании флоры и анализе жизненных форм использовали распространенную и универсальную систему К. Раункиера [11].

Флору Кармановского водохранилища исследовали в 2016–2017 гг. по следующим направлениям: систематический, таксономический, экологический анализ, ресурсная оценка.

## Результаты и обсуждение

Систематический анализ флоры (табл. 1) показал, что наиболее распространенными семействами в пределах окрестностей Кармановского водохранилища являются следующие: *Asteraceae*

Т а б л и ц а 1  
Систематический анализ флоры  
окрестностей Кармановского водохранилища  
Systematic analysis of the flora in the vicinity  
of the Karmanov reservoir

Семейство	Число видов в семействе, шт.	Процент общего числа видов, %	Число родов в семействе, шт.	Доля общего числа родов, %
<i>Asteraceae</i>	19	16,8	10	13,9
<i>Poaceae</i>	17	15,0	8	11,1
<i>Fabaceae</i>	12	10,6	6	5,3
<i>Brassicaceae</i>	8	7,2	7	9,7
<i>Polygonaceae</i>	7	6,2	5	6,9
<i>Caryophyllaceae</i>	6	5,3	4	5,6
<i>Rosaceae</i>	5	4,4	4	5,6
<i>Pinaceae</i>	4	3,5	3	4,2
<i>Apiaceae</i>	4	3,5	2	2,8
<i>Betulaceae</i>	3	2,6	1	1,4
<i>Boraginaceae</i>	3	2,6	3	4,2
<i>Lamiaceae</i>	3	2,6	2	2,8
<i>Equisetaceae</i>	3	2,6	1	1,4
<i>Hypericaceae</i>	3	2,6	1	1,4
<i>Aceraceae</i>	2	1,8	1	1,4
<i>Salicaceae</i>	2	1,8	1	1,4
<i>Urticaceae</i>	2	1,8	2	2,8
<i>Solanaceae</i>	2	1,8	2	2,8
<i>Tiliaceae</i>	1	0,9	1	1,4
<i>Ulmaceae</i>	1	0,9	1	1,4
<i>Fagaceae</i>	1	0,9	1	1,4
<i>Ranunculaceae</i>	1	0,9	1	1,4
<i>Plantaginaceae</i>	1	0,9	1	1,4
<i>Convolvulaceae</i>	1	0,9	1	1,4
<i>Cannabaceae</i>	1	0,9	1	1,4
<i>Dryopteridaceae</i>	1	0,9	1	1,4
Итого	113	100	72	100

(19 видов), *Poaceae* (17), *Fabaceae* (12), *Brassicaceae* (8), *Polygonaceae*, (7 видов). Семейства *Rosaceae* *Caryophyllaceae* и *Rosaceae* представлены 5–6 видами, семейства *Betulaceae*, *Boraginaceae*, *Lamiaceae*, *Equisetaceae*, *Hypericaceae*, *Salicaceae*, *Urticaceae*, *Solanaceae* включают по 2–3 вида. Остальные семейства (*Tiliaceae*, *Ulmaceae*, *Ranunculaceae*, *Plantaginaceae*, *Convolvulaceae*, *Cannabaceae*, *Dryopteridaceae*) представлены одним видом.

Таксономический анализ флоры окрестностей Кармановского водохранилища показал, что флора по представлена 113 видами растений, которые принадлежат к 72 родам и 26 семействам.

Биоморфологический анализ флоры окрестностей Кармановского водохранилища представлен в табл. 2.

Экологический анализ флоры проводится в целях выявления экологических групп растений. Критерием для отнесения видов растений к той или иной экологической группе послужила неодинаковая приспособленность их к таким факторам, как водный режим, засоленность и эрозия почв, а также ее температура и механический состав. По отношению к воде и минеральному питанию согласно экологическому анализу выделены следующие экологические типы растений: гигрофиты, мезофиты, ксерофиты и промежуточные между ними типы (табл. 3).

Из экологического спектра видов по отношению к фактору увлажнения видно, что во флоре преобладают мезофиты (64 вида) — растения, распространенные в условиях среднего увлажнения: лещина обыкновенная (*Corylus avellana* L.), полевица (*Agrostis capillaris* L.), клевер луговой (*Trifolium pratense* L.) и др. Также массово встречаются такие экологические группы как ксерофиты (37 видов) — представители сухих местообитаний. В условиях более плодородных почв произрастают: пырей ползучий (*Elytrigia répens* (L.) Desv. ex Nevski), сосна обыкновенная (*Pinus silvestris* L.), и др.

Установлено, что по типам опыления во флоре окрестностей Кармановского водохранилища преобладают энтомофильные растения (51 вид), а также много самоопыляемых растений (табл. 4).

Анализ флоры окрестностей Кармановского водохранилища по отношению к свету (табл. 5) показал, что преобладают светолюбивые (60 видов), теневыносливые (49) и тенелюбивые (4 видов) растения. К группе светолюбивых растений принадлежат многие деревья и кустарники, например *Betula pendula* L., *Larix sibirica* Ledeb., *Pinus sylvestris* L., *Crataegus sanguinea* Pall., которые произрастают в разреженных посадках.

Ресурсная характеристика флоры позволила выделить следующие группы растений:

Т а б л и ц а 2

**Биоморфологический анализ флоры окрестностей Кармановского водохранилища**  
**Biomorphological analysis of the flora in the vicinity of the Karmanov reservoir**

Жизненная форма	Число видов, шт.	Доля общего числа видов, %
Деревья	13	11,5
Кустарники	3	2,6
Травянистые растения	96	84,9
Итого:	113	100

Т а б л и ц а 3

**Экологический анализ флоры окрестностей Кармановского водохранилища**  
**Ecological analysis of the flora surrounding the Karmanov reservoir**

Экологическая группа	Число видов, шт.	Доля общего числа видов, %
Ксерофиты	37	32,7
Мезофиты	67	59,3
Гигрофиты	9	8,0
Итого:	113	100

Т а б л и ц а 4

**Анализ по типам опыления растений**  
**Type pollination analysis**

Тип опыления	Число видов	Доля общего числа видов, %
Самоопыление (автогамия)	34	30,1
Перекрестное опыление (ксеногамия):	3	2,7
с помощью ветра	25	22,1
насекомыми	51	45,1
Итого:	113	100

Т а б л и ц а 5

**Анализ флоры окрестностей Кармановского водохранилища по отношению к свету**  
**Analysis of the flora in the vicinity of the Karmanov reservoir in relation to light**

Тип растений по отношению к свету	Число видов, шт.	Доля общего числа видов, %
Гелиофиты (светолюбивые)	60	53,1
Сциофиты (тенелюбивые)	4	3,5
Теневыносливые	49	43,4
Итого:	113	100

1. Растения — источники древесины. Обнаружено всего 11 видов, которые представлены светлыхвойными — *Pinus sylvestris* L., *Larix sibirica* Ledeb., темнохвойными породами — *Picea obovata* Ledeb., *Abies sibirica* Ledeb., широколиственными породами с твердой древесиной: дубом (*Quercus robur* L.), кленом американским

(*Acer negundo* L.), кленом платановидным, или остролистным (*Acer platanoides* L.), широколиственными породами с мягкой древесиной, в частности липой (*Tilia cordata* Mill.) — наиболее распространенным на изучаемой территории видом широколиственных деревьев, мелколиственными породами с мягкой древесиной — березой повислой (*Betula pendula* L.).

2. **Лекарственные растения.** Многие виды, достаточно широко распространенные в лесах Башкортостана, являются ценными лекарственными растениями. Обнаружены такие виды, как береза повислая (*Betula pendula* L.), почки и молодые листья которой используются в лечебных целях; боярышник кроваво-красный (*Crataegus sanguinea* Pall.), используются цветки, плоды; дуб черешчатый (*Quercus robur* L.) — кора с молодых деревьев, липа сердцелистная (*Tilia cordata* Mill.) — соцветия; малина обыкновенная (*Rubus idaeus* L.) — плоды; рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia* L.) — плоды; сосна лесная (*Pinus sylvestris* L.) — почки, хвоя, пыльца, живица; черемуха обыкновенная (*Padus avium* L.) — плоды; шиповник майский (*Rosa majalis* L.) — плоды; земляника лесная (*Fragaria vesca* L.) — листья и плоды; папоротник мужской (*Dryopteris filix-mas* (L.) Schott) — корневища; хмель обыкновенный (*Humulus lupulus* L.) — соплодия.

## Выводы

Флора Кармановского водохранилища включает в себя в целом 113 видов растений, в том числе деревьев — 13 видов, кустарников — 3 вида, травянистых растений 96 видов. При систематическом анализе было определено, что наиболее представленными семействами на изученной территории являются представители *Asteraceae*, *Fabaceae*, *Poaceae*, *Brassicaceae*, *Polygonaceae*. Отмечено, что по типам опыления во флоре окрестностей Кармановского водохранилища преобладают энтомофильные растения. Во флоре окрестностей Кармановского водохранилища встречаются породы с твердой и мягкой древесиной, а также лекарственные растения.

## Список литературы

- Антипин И.А., Минина Н.Н. Анализ флоры с. Прибельский муниципального района Кармаскалинский район Республики Башкортостан по жизненным формам // Сб. статей Междунар. науч.-практ. конф. «Внедрение результатов инновационных разработок: проблемы и перспективы», 15 августа 2017 г., г. Уфа. В 2 ч. Ч.2. Уфа: АЭТЕРНА, 2017. С. 29–33.
- Наумова Л.Г., Миркин Б.М., Мулдашев А.А., Мартыненко В.Б., Ямалов С.М. Флора и растительность Башкортостана. Уфа: БГПУ, 2011. 174 с.
- Растительный мир Башкортостана. URL: [http://www.uralgeo.net/flora\\_ba](http://www.uralgeo.net/flora_ba) (дата обращения 04.04.2018).
- Флора. URL: <http://freedom.net/link.html> (дата обращения 01.05.2018).
- Флора и растительность Башкортостана. URL: [http://herba.msu.ru/shipunov/school/books/naumova2011\\_flora\\_i\\_rastitelnost\\_baschkortostana.pdf](http://herba.msu.ru/shipunov/school/books/naumova2011_flora_i_rastitelnost_baschkortostana.pdf) (дата обращения 22.04.2018).
- Индикаторная роль растительности при экологических исследованиях. URL: <http://www.eco.nw.ru/lib/data/10/07/020710.htm> (дата обращения 18.04.2018).
- Азанов А. Бассейновый совет в Уфе: водные ресурсы Башкортостана // Табигат, 2013. № 1. С. 10–11.
- Арамелева О. Состояние водных ресурсов в цифрах и фактах // Табигат, 2012. № 2. С. 12–13.
- Хасанова Д.Н., Шакирова С.М., Исянбаев М.Н. Рациональное использование водных ресурсов как фактор устойчивого социально-экономического развития региона (на примере Республики Башкортостан) // Современные проблемы науки и образования, 2014. № 5. С. 78–85.
- Загитова Л.Р. Особенности формирования водных ресурсов Республики Башкортостан // Медицина труда и экология человека, 2016. № 2. С. 38–43.
- Зинатуллина В.Р., Минина Н.Н. Флора Аскинского района деревни Бильгиш // Сб. статей Междунар. науч.-практ. конф. «Проблемы современных интеграционных процессов и пути их решения». (3 апреля 2017 г., г. Казань). В 2 ч. Ч. 2. Уфа: МЦИИ Омега Сайнс, 2017. С. 3–5.
- Носов С.И., Хасанова Д.Н., Юлаева Г.Н. Экономическая оценка водных ресурсов в управлении природопользованием // Современные проблемы управления проектами в инвестиционно-строительной сфере и природопользовании / под ред. В.И. Ресина, 2017. С. 124–129.
- Хасанова Д.Н. Водные ресурсы Республики Башкортостан: проблемы потребления, охраны и обеспеченности // сб. науч. тр. «Актуальные вопросы университетской науки». Уфа, 2016. С. 404–415.
- Козлова Г.Г., Онина С.А., Минина Н.Н., Михайлова А.С. Определение содержания селена и тяжелых металлов в растительном сырье и прикорневой почве // Проблемы региональной экологии, 2018. № 4. С. 22–24.
- Минина Н.Н., Гилимшина Л.И. Флора окрестностей Кармановского водохранилища Республики Башкортостан // Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию Горно-Алтайского государственного университета «Трансграничные регионы в условиях глобальных изменений: современные вызовы и перспективы развития», 26–28 ноября 2019. Горно-Алтайск: ГАГУ, 2019. С. 112–115.
- Козлова Г.Г., Зинов А.С., Минина Н.Н., Онина С.А., Урманов С.М. Сравнительная характеристика некоторых химических показателей воды озер Подворное, Долгое и Широкое Бирского района Республики Башкортостан // Современные проблемы науки и образования, 2017. № 5. С. 357.
- Minigazimov N., Khaidarshina E., Abdrahamanov R., Safarova V., Shaidullina G., Khasanova L., Mustafin R., Zagitova L., Kutliyarov D., Kutliyarov A. City snow dumps of a large industrial centre as a source of surface water pollution (on the example of Ufa city) // Asian Journal of Water, Environment and Pollution, 2019, t. 16, no. 2, pp. 51–58.
- Mustafin R.F., Ryzhkov I.B., Sultanova R.R., Khabirov I.K., Khasanova L.M., Zagitova L.R., Asylbaev I.G., Kutliyarov D.N., Zubairov R.R., Rayanova A.R. Assessment of slope stability in coastal water protection zones // Journal of Engineering and Applied Sciences, 2018, t. 13, no. S10, pp. 8331–8337.
- Zagitova L.R., Minigazimov N.S., Khaidarshina E.T., Kutliyarov D.N., Kutliyarov A.N. Impact of anthropogenic factors on runoff formation in the Southern Urals // Asian Journal of Water, Environment and Pollution, 2019, t. 16, no. 4, pp. 7–15.
- Исянбаев М.Н. Стратегия развития территориальных социально-экономических систем региона: приоритетные направления, механизмы реализации // Проблемы востоковедения, 2018. № 3 (81). С. 21–26.

## Сведения об авторах

**Минина Наталья Николаевна** — канд. биол. наук, доцент ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет» (Бирский филиал), mnn27@mail.ru

**Гилимшина Лейла Илшатовна** — магистрант ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет» (Бирский филиал)

Поступила в редакцию 15.03.2019.

Принята к публикации 23.01.2020.

## ANALYSIS AND RESOURCE CHARACTERISTICS OF FLORA SURROUNDING KARMANOV RESERVOIR IN BASHKORTOSTAN REPUBLIC

**N.N. Minina, L.I. Gilimshina**

Bashkir State University (Birsk branch), 10, st. International, Birsk, Bashkortostan, 452453, Russia

mnn27@mail.ru

The article presents data on the study of the flora of the neighborhoods of the Karmanovsky reservoir of the Republic of Bashkortostan. This flora contains 113 species of plants: 13 species of trees, 3 species of shrubs, 96 species of herbaceous plants. In a systematic analysis, it was determined that the most represented families in the study area are representatives of *Asteraceae*, *Fabaceae*, *Poaceae*, *Brassicaceae*, *Polygonaceae*. It is noted that by pollination types in the flora of the vicinity of the Karmanovsky reservoir, plants pollinated with insects prevail — 51 species, and self-pollinating plants — 34 species. As a result of the analysis of the flora of the neighborhoods of the Karmanovsky reservoir, light-loving plants (60 species) and shade-tolerant plants prevail (49 species), shade-loving species are found (4 species), for example, many trees and shrubs belong to the group of light-loving plants, for example, *Betula pendula* Roth., *Larix sibirica* L., *Pinus silvestris* L., which grow in Ezhzhennye landings. These include herbaceous plants of the steppes (*Plantago major* L., *Phleum nodosum* L.). Shade-loving — *Acer negundo* L., *Tilia cordata* Mill., etc. The paper presents data on the resource characteristics of the studied plant species. In the flora of the vicinity of the Karmanovsky reservoir there are rocks with hard (*Quercus robur* L., *Acer negundo* L., *Acer platanoides* L.) and soft wood (*Tilia cordata* Mill., *Betula pendula* L.). A list of medicinal plants found in this flora is given, for example, *Crataegus sanguinea*, *Quercus robur* L., *Viburnum opulus* L., *Tilia cordata* L., *Rubus idaeus* L., *Sorbus aucuparia* L., *Pinus sylvestris* L., *Padus avium* Mill., *Rosa majalis* Herrm., *Equisetum arvense* L., *Hypericum perforatum* L., etc.

**Keywords:** flora, flora analysis, systematic analysis, taxonomic analysis, life forms

**Suggested citation:** Minina N.N., Gilimshina L.I. *Analiz i resursnaya kharakteristika flory okrestnostey Karmanovskogo vodokhranilishcha Respubliki Bashkortostan* [Analysis and resource characteristics of flora surrounding Karmanovo reservoir in Bashkortostan Republic]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 2, pp. 17–22. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-17-22

## References

- [1] Antipin I.A., Minina N.N. *Analiz flory s. Pribel'skiy munitsipal'nogo rayona Karmaskalinskiy rayon Respubliki Bashkortostan po zhiznennym formam* [Flora analysis Pribelsky municipal district Karmaskalinsky district of the Republic of Bashkortostan on life forms] Sb. statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Vnedrenie rezul'tatov innovatsionnykh razrabotok: problemy i perspektivy» [Introduction of the results of innovative developments: problems and prospects a collection of articles of the International Scientific and Practical Conference (August 15, 2017, Ufa). In 2 hours. Part 2]. Ufa: AETERNA, 2017, pp. 29–33.
- [2] Naumova L.G., Mirkin B.M., Muldashev A.A., Martynenko V.B., Yamalov S.M. *Flora i rastitel'nost' Bashkortostana* [Flora and vegetation of Bashkortostan: studies. allowance]. Ufa: BSPU, 2011, 174 p.
- [3] *Rastitel'nyy mir Bashkortostana* [The flora of Bashkortostan]. Available at: [http://www.uralgeo.net/flora\\_ba](http://www.uralgeo.net/flora_ba) (accessed 04.04.2018).
- [4] *Flora* [Flora]. Available at: <http://greedom.net/link.html> (accessed 01.05.2018).
- [5] *Flora i rastitel'nost' Bashkortostana* [Flora and vegetation of Bashkortostan]. Available at: [http://herba.msu.ru/shipunov/school/books/naumova2011\\_flora\\_i\\_rastitelnost\\_baschkortostana.pdf](http://herba.msu.ru/shipunov/school/books/naumova2011_flora_i_rastitelnost_baschkortostana.pdf) (accessed 22.04.2018).
- [6] *Indikatornaya rol' rastitel'nosti pri ekologicheskikh issledovaniyakh* [The indicator role of vegetation in environmental studies]. Available at: <http://www.eco.nw.ru/lib/data/10/07/020710.htm> (accessed 18.04.2018).
- [7] Azanov A. *Basseynovyy sovet v Ufe: vodnye resursy Bashkortostana* [Basin Council in Ufa: the water resources of Bashkortostan]. *Tabigat*, 2013, no. 1, pp. 10–11.
- [8] Arameleva O. *Sostoyaniye vodnykh resursov v tsifrah i faktakh* [The state of water resources in facts and figures]. *Tabigat*, 2012, no. 2, pp. 12–13.
- [9] Khasanova D.N., Shakirova S.M., Isyanbaev M.N. *Ratsional'noe ispol'zovanie vodnykh resursov kak faktor ustoychivogo sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya regiona (na primere Respubliki Bashkortostan)* [Rational use of water resources as a factor of sustainable socio — economic development of the region (on the example of the Republic of Bashkortostan)] *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education]. 2014, no. 5, pp. 78–85.

- [10] Zagitova L.R. *Osobennosti formirovaniya vodnykh resursov Respubliki Bashkortostan* [Features of the formation of water resources of the Republic of Bashkortostan] *Meditina truda i ekologiya cheloveka* [Occupational medicine and human ecology], 2016, no. 2, pp. 38–43.
- [11] Zinatullina V.R., Minina N.N. *Flora Askinskogo rayona derevni Bil'gish* [Flora of the Askinsky district of the Bilgish village] *Sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Problemy sovremennykh integratsionnykh protsessov i puti ikh resheniya»* [Problems of modern integration processes and ways to solve them. Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference], April 3, 2017, Kazan, part 2. Ufa: MTsII Omega Sayns, 2017, pp. 3–5.
- [12] Nosov S.I., Khasanova D.N., Yulaeva G.N. *Ekonomicheskaya otsenka vodnykh resursov v upravlenii prirodopol'zovaniem* [Economic assessment of water resources in nature management] *Sovremennye problemy upravleniya proektami v investitsionno-stroitel'noy sfere i prirodopol'zovanii* [Modern problems of project management in the investment and construction industry and environmental management]. Ed. V.I. Resin, 2017, pp. 124–129.
- [13] Khasanova D.N. *Vodnye resursy Respubliki Bashkortostan: problemy potrebleniya, okhrany i obespechennosti* [Water resources of the Republic of Bashkortostan: problems of consumption, protection and security] *Sb. nauch. tr. «Aktual'nye voprosy universitetskoy nauki»* [«Actual issues of university science»]. Ufa, 2016, pp. 404–415.
- [14] Kozlova G.G., Onina S.A., Minina N.N., Mikhaylova A.S. *Opreделение содержания селена и тяжелых металлов в растительной и прикорневой почве* [Determination of the content of selenium and heavy metals in plant raw materials and basal soil]. *Problemy regional'noy ekologii* [Problems of Regional Ecology], 2018, no. 4, pp. 22–24.
- [15] Minina N.N., Gilimshina L.I. *Flora okrestnostey Karmanovskogo vodokhranilishcha Respubliki Bashkortostan* [Flora of the surroundings of the Karmanovsky reservoir of the Republic of Bashkortostan] *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 70-letiyu Gorno-Altayskogo gosudarstvennogo universiteta «Transgranichnye regiony v usloviyakh global'nykh izmeneniy: sovremennye vyzovy i perspektivy razvitiya»* [Materials of the International scientific-practical conference dedicated to the 70th anniversary of the Gorno-Altai State University «Transboundary regions in the context of global changes: modern challenges and development prospects»] November 26–28, 2019, pp. 112–115.
- [16] Kozlova G.G., Zinov A.S., Minina N.N., Onina S.A., Usmanov S.M. *Sravnitel'naya kharakteristika nekotorykh khimicheskikh pokazateley vody ozer Podvornoe, Dolgoe i Shirokoe Birskego rayona Respubliki Bashkortostan* [A comparative characteristic of some chemical indicators of water in the Podvornoye, Dolgoe and Shirokoye lakes of the Birk District of the Republic of Bashkortostan] *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education], 2017, no. 5, p. 357.
- [17] Minigazimov N., Khaidarshina E., Abdrahmanov R., Safarova V., Shaidullina G., Khasanova L., Mustafin R., Zagitova L., Kutliyarov D., Kutliyarov A. City snow dumps of a large industrial center as a source of surface water pollution (on the example of Ufa city). *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 2019, t. 16, no. 2, pp. 51–58.
- [18] Mustafin R.F., Ryzhkov I.B., Sultanova R.R., Khabirov I.K., Khasanova L.M., Zagitova L.R., Asylbaev I.G., Kutliyarov D.N., Zubairov R.R., Rayanova A.R. Assessment of slope stability in coastal water protection zones. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2018, t. 13, no. S10, pp. 8331–8337.
- [19] Zagitova L.R., Minigazimov N.S., Khaidarshina E.T., Kutliyarov D.N., Kutliyarov A.N. Impact of anthropogenic factors on runoff formation in the Southern Urals. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 2019, t. 16, no. 4, pp. 7–15.
- [20] Isyanbaev M.N. *Strategiya razvitiya territorial'nykh sotsial'no-ekonomicheskikh sistem regiona: prioritetnye napravleniya, mekhanizmy realizatsii* [The development strategy of the territorial socio-economic systems of the region: priority areas, implementation mechanisms]. *Problemy vostokovedeniya* [Problems of Oriental Studies], 2018, no. 3 (81), pp. 21–26.

## Authors' information

**Minina Natalya Nikolaevna** — Cand. Sci. (Biologi), Associate Professor of the Federal State Budget Educational Establishment of the Higher Education (Birk branch) [mnn27@mail.ru](mailto:mnn27@mail.ru)

**Gilimshina Leila Ilshatovna** — student of the Federal State Budget Educational Establishment of the Higher Education Bashkir State University (Birk branch)

Received 15.03.2019.

Accepted for publication 23.01.2020.

## СТРУКТУРА ЛИСТА ОСИНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ *POPULUS TREMULA* L. И ОСИНЫ ГИБРИДНОЙ (*POPULUS TREMULA* L. × *POPULUS TREMULOIDES* MICHX.) (SALICACEAE) В КЛОНОВОМ АРХИВЕ

С.Н. Плюснина, А.Л. Федорков

Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, 167982, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28

pljusnina@ib.komisc.ru

Приведены данные по площади и анатомической структуре листа семи клонов осины гибридной (*Populus tremula* L. × *Populus tremuloides* Michx.) и семи клонов осины обыкновенной *Populus tremula* L. в возрасте 10 лет, произрастающих в клонном архиве Института биологии Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар, Республика Коми). Показано, что площадь листа гибрида превосходит площадь листа осины обыкновенной на 44,6 % ( $p < 0,0001$ ), а толщина листа — на 8,8 % ( $p < 0,0001$ ). Получены и проанализированы данные морфометрии клеток и тканей листа, на основании которых высказано предположение о том, что увеличение морфологических параметров листа осины гибридной относительно материнской породы связано с ростом числа преимущественно антиклинальных клеточных делений при формировании листовой пластинки. Установлено, что толщина эпидермы, столчатого и губчатого мезофилла, высота клеток столчатого мезофилла и число рядов клеток губчатого мезофилла в листе осины гибридной статистически значимо превосходят таковые у осины обыкновенной.

**Ключевые слова:** *Populus tremula* L., *Populus tremula* L. × *Populus tremuloides* Michx., клоны, площадь листа, анатомия листа

**Ссылка для цитирования:** Плюснина С.Н., Федорков А.Л. Структура листа осины обыкновенной *Populus tremula* L. и осины гибридной (*Populus tremula* L. × *Populus tremuloides* Michx.) (Salicaceae) в клонном архиве // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 2. С. 23–28. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-23-28

Осина гибридная (*Populus tremula* L. × *Populus tremuloides* Michx.) получена в результате скрещивания евразийского вида *Populus tremula* L. и североамериканского вида *Populus tremuloides* Michx.

Высокая продуктивность, короткий оборот рубки и способность восстанавливаться после рубки вегетативным путем обусловили повышенный интерес селекционеров к осине гибридной при создании многоцелевых лесных плантаций в странах Северной Европы [1–5]. В частности, в Южной Швеции и Финляндии среднегодовой прирост гибридной осины достигает 25 м<sup>3</sup> ствольной древесины на 1 га в год при обороте рубки 25 лет, что соответствует 8,2 т сухого вещества [6, 7].

В настоящее время ведется активный поиск наиболее перспективных для Северо-Запада России клонов осины гибридной [8, 9].

Одной из причин быстрого роста осины гибридной считается соматический гетерозис, т. е. способность гибридов обгонять в росте материнские виды [10]. Предполагается, что признаками, обуславливающими соматический гетерозис, могут быть количество и длина междоузлий, число листьев, площадь листа, размеры клеток листа, количество клеток на единицу площади листа и др. [11]. В литературе приведены особенности строения и свойств древесины видов рода *Populus* [12, 13], а также анатомия листьев некоторых видов этого рода и их гибридов, обсуждаются возможные связи структурных параметров листа и ростовых параметров деревьев [14, 15].

### Цель работы

Цель работы — проведение сравнительного исследования морфологических и анатомических параметров листа осины обыкновенной *Populus tremula* и осины гибридной (*Populus tremula* × *Populus tremuloides*) в клонном архиве.

### Материалы и методы

Объектом исследования служил клонный архив Института биологии Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар, Республика Коми, подзона средней тайги), заложенный посадкой однолетних укорененных саженцев с закрытой корневой системой в сентябре 2009 г. [8]. Для исследования взято по семь клонов осины гибридной и осины обыкновенной.

Для морфологических и анатомических исследований в июле 2018 г. срезали побеги из средней части кроны с южной стороны дерева. В работе использовали сформированные листья с укороченных побегов. Определяли такие параметры, как площадь, удельная поверхностная плотность листа (УППЛ) и толщина листа, толщина мезофилла, в том числе столчатого и губчатого по отдельности, а также их соотношение. Получены данные также по числу рядов клеток обоих типов мезофилла и их размеров. Поперечные срезы для приготовления временных препаратов получали из высечек между крупными жилками на уровне наиболее широкой части листа. Срезы изучали

с помощью микроскопа Axiovert 200 M (Carl Zeiss, Германия). Фотосъемку проводили цифровой камерой AxioCam ERc 5s (Carl Zeiss, Германия). Морфометрические измерения осуществляли в программе Carl Zeiss Vision (Carl Zeiss, Германия). Удельную поверхностную плотность листа считали как отношение абсолютно сухой массы листа, высушенного при температуре 105 °С, к его площади.

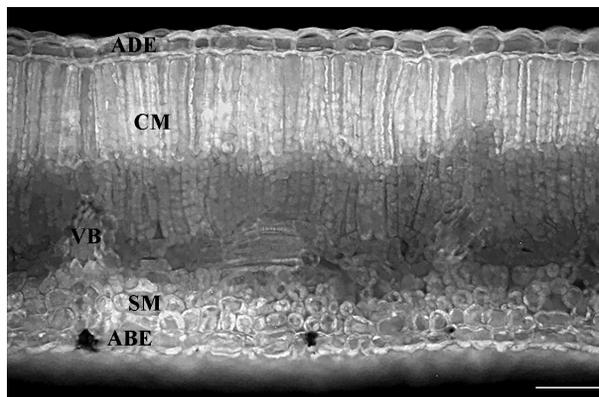
Для статистического анализа рассчитывали средние значения анатомических признаков для каждого листа (по десяти измерениям). У каждого клона проанализировано по 10 листьев. Согласно Н.Н. Свалову [16], распределение средних значений близко к нормальному, даже если исходная совокупность не является нормальной, что позволяет использовать параметрические тесты для статистического анализа данных.

Значимость различий между осиной обыкновенной и осиной гибридной оценивали с помощью *t*-критерия Стьюдента. Для статистического анализа использован пакет программ Statistica 6.0.

## Результаты и обсуждение

Как показали исследования, схема строения листа на поперечном срезе одинакова для осины гибридной и осины обыкновенной и включает в себя в межпучковом пространстве адаксиальную (верхнюю) эпидерму, столбчатый мезофилл (два ряда клеток, очень редко три), губчатый мезофилл (4–6 рядов клеток) и абаксиальную (нижнюю) эпидерму (рисунок).

Площадь листа осины гибридной статистически значимо ( $p < 0,0001$ ) — на 44,6 % превосходит площадь листа осины обыкновенной (см. таблицу). Основной вклад в интеркалярный рост, благодаря которому лист достигает своего окончательного размера, вносят антиклинальные деления клеток пластинчатой меристемы [17]. Кроме числа клеток, образовавшихся вследствие деятельности меристемы, площадь листа зависит от тангентальных размеров и плотности расположения клеток в ряду основной ткани. Около 50 % объема листа изученных образцов в межпучковом пространстве и около 80 % основной фотосинтезирующей ткани (мезофилла) занимает столбчатый мезофилл. Плотность расположения клеток столбчатого мезофилла не различается между видами. На поперечном срезе листа в первом ряду ткани у осины гибридной и осины обыкновенной на 1 мм длины среза приходится соответственно 88,8 и 87,1 клеток. Диаметр (короткая ось на поперечном срезе) этих клеток у осины гибридной ( $p < 0,05$ ) меньше на 3 %, чем у осины обыкновенной. В связи с этим увеличение площади листа свидетельствует о прямом увеличении



Поперечный срез листа осины гибридной (*Populus tremula* L. × *Populus tremuloides* Michx.): ADE — адаксиальная эпидерма; CM — столбчатый мезофилл; SM — губчатый мезофилл; ABE — абаксиальная эпидерма; VB — проводящий пучок; размер линейки 50 мкм

Leaf cross section of hybrid aspen (*Populus tremula* L. × *Populus tremuloides* Michx.): ADE — adaxial epidermis; CM — columnar mesophyll; SM — spongy mesophyll; ABE — abaxial epidermis; VB — vascular bundle; line size 50 μm

числа клеток в ряду столбчатого мезофилла, т. е. более активной деятельности пластинчатой меристемы листа гибрида в период его роста, в большем количестве антиклинальных делений по сравнению с материнскими видами.

От радиальных размеров слагающих ткани клеток и числа их рядов зависит толщина листовая пластинки. По толщине листа осина гибридная превосходит осину обыкновенную на 8,8 % (см. таблицу). Это связано с повышением значений параметров как покровных, так и фотосинтезирующих тканей. По толщине эпидермы осина гибридная ( $p < 0,0001$ ) превосходит осину обыкновенную на 16,2 и 9,8 % для адаксиальной и абаксиальной поверхностей соответственно (см. таблицу), по толщине ассимиляционной паренхимы — на 10 %. В увеличении последней участвуют как столбчатый, так и губчатый мезофилл, причем в равной степени, поэтому их соотношение у исследуемых культур не отличается. Среднее число рядов клеток столбчатого мезофилла на поперечных срезах листа у исследуемых осин одинаковое. Большая толщина столбчатого мезофилла осины гибридной связана с увеличением радиальных размеров клеток. Так, высота первого ряда клеток столбчатой паренхимы осины гибридной ( $p < 0,01$ ) превосходит таковую осины обыкновенной 7,0 %.

Увеличение толщины губчатого мезофилла в листьях осины гибридной связано с формированием большего числа рядов клеток (см. таблицу). Их диаметр (по короткой оси) у осины гибридной ( $p < 0,05$ ) уступает параметру рядов осины обыкновенной на 3,6 %.

### Характеристика структуры листа осины гибридной и осины обыкновенной

#### The structure characteristics of aspen hybrid and aspen ordinary leaves

Параметр	<i>Populus tremula</i> L. × <i>Populus tremuloides</i> Michx.	<i>Populus tremula</i> L.	<i>p</i>
Площадь листа, см <sup>2</sup>	24,3 ± 0,79	16,3 ± 0,88	< 0,0001
УППЛ, г/м <sup>2</sup>	86,5 ± 1,7	83,5 ± 1,2	Н. з.
Толщина листа, мкм	195,2 ± 2,2	177,0 ± 1,3	< 0,0001
Толщина адаксиальной эпидермы, мкм	20,7 ± 0,3	17,8 ± 0,2	< 0,0001
Толщина абаксиальной эпидермы, мкм	15,7 ± 0,1	14,3 ± 0,2	< 0,0001
Толщина мезофилла, мкм	158,4 ± 2,2	146,7 ± 1,3	< 0,0001
Толщина столбчатого мезофилла, мкм	94,1 ± 1,8	87,2 ± 1,2	< 0,05
Толщина губчатого мезофилла, мкм	64,6 ± 0,7	60,1 ± 0,6	< 0,0001
Отношение толщины столбчатого к толщине губчатого мезофилла	1,48 ± 0,03	1,48 ± 0,03	Н. з.
Высота клеток столбчатого мезофилла, мкм	53,7 ± 0,9	50,2 ± 0,9	< 0,01
Диаметр клеток столбчатого мезофилла, мкм	12,8 ± 0,1	13,2 ± 0,1	< 0,05
Диаметр клеток губчатого мезофилла, мкм	13,3 ± 0,2	13,8 ± 0,3	Н. з.
Число рядов клеток столбчатого мезофилла	2,01 ± 0,006	2,01 ± 0,006	Н. з.
Число рядов клеток губчатого мезофилла	4,84 ± 0,04	4,41 ± 0,04	< 0,0001
<i>Примечание.</i> Н. з. — различие между видами статистически незначимо.			

Таким образом, утолщение листовой пластинки происходит за счет увеличения радиальных размеров клеток эпидермы и столбчатого мезофилла, а также увеличения числа рядов клеток губчатого мезофилла. Последнее является свидетельством большего числа периклинальных делений клеток при формировании листа осины гибридной по сравнению с осиной обыкновенной.

Удельная поверхностная плотность листа связана со многими аспектами роста и развития растения, косвенно характеризует толщину листа, отражает адаптацию фотосинтетического аппарата к комплексу условий среды [18]. Динамика УППЛ адекватно отражает увеличение числа клеток в период формирования листовой пластинки, их активное деление. После окончания клеточных делений УППЛ будет расти до тех пор, пока полностью не сформируются клеточные оболочки, которые составляют значительную долю в абсо-

лютно сухой массы листа. Таким образом, даже с одинаковым числом клеток на единицу площади листовой пластинки УППЛ разных объектов может значительно отличаться как минимум по причине толщины клеточных стенок. УППЛ используется при сравнении межвидовых и внутривидовых сортов и форм как травянистых [19], так и древесных растительных объектов [20]. Осина гибридная превосходит осину обыкновенную по УППЛ на 3,3 %, но это различие статистически незначимо (см. таблицу).

В литературе обсуждается связь между морфологическими и анатомическими признаками основного фотосинтезирующего органа и признаками, характеризующими интенсивность накопления биомассы. Для этого проводятся масштабные работы по селекции быстрорастущих пород. Так, на примере гибридного тополя (*Populus × euramericana* Dode (Guinier)) показано, что в первый год после посадки толщина столбчатого мезофилла листьев положительно коррелирует с биомассой, а площадь листа — с высотой и биомассой клонов [14]. На гибридных осинах после первого года вегетации выявлена положительная связь между количеством междоузлий и листьев, высотой и диаметром стволика [11]. По мере роста дерева происходит ветвление побегов, и его общая фотосинтезирующая поверхность зависит как от параметров, так и от общего числа формирующихся листьев. Поэтому связь между площадью листа и ростовыми признаками с возрастом растения ослабевает. На других генотипах тополей после третьего периода вегетации связь между площадью листа и биомассой надземных побегов обнаружена не была [15]. Согласно нашим данным, у 10-летних клонов не установлена корреляция между рассмотренными в данной работе структурными показателями листа и диаметром и высотой ствола осины гибридной и осины обыкновенной. Тем не менее после пятого периода вегетации сравнительная оценка деревьев в клоновом архиве Института биологии Коми НЦ УрО РАН подтвердила закономерность превышения показателей осины гибридной относительно осины обыкновенной: по высоте на 26 %, а после десятого периода вегетации — по диаметру на 65, по высоте на 49 %, по объему ствола более чем в 3 раза. Увеличение размеров фотосинтезирующих органов растения свидетельствует об успешной адаптации и способствует высокой интенсивности роста осины гибридной в условиях подзоны средней тайги.

### Выводы

Таким образом, в условиях подзоны средней тайги лист осины гибридной, произрастающей в клоновом архиве, по площади и толщине пре-

восходит лист осины обыкновенной. Увеличение морфологических параметров листа осины гибридной относительно материнской породы связано с повышением числа преимущественно антиклинальных клеточных делений при формировании листовой пластинки и радиальных размеров клеток эпидермы и столбчатого мезофилла.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Института биологии Коми НЦ УрО РАН «Пространственно-временная динамика структуры и продуктивности фитоценозов лесных и болотных экосистем на европейском Северо-Востоке России», номер государственной регистрации АААА-А17-117122090014-8.*

## Список литературы

- [1] Jansons A., Zeps M., Rieksts-Riekstīns J., Matisons R., Krišāns O. Height increment of hybrid aspen *Populus tremula* × *P. tremuloides* as a function of weather conditions in south-western part of Latvia // *Silva Fennica*, 2014, v. 48, no. 5. Article id. 1124. DOI: 10.14214/sf.1124
- [2] Pliūra A., Sushockas V., Sarsekova D., Gudynaite V. Genotypic variation and heritability of growth and adaptive traits, and adaptation of young poplar hybrids at northern margins of natural distribution of *Populus nigra* in Europe // *Biomass and Bioenergy*, 2014, vol. 70, pp. 513–529. DOI: 10.1016/j.biombioe.2014.09.011
- [3] Zeps M., Adamovics A., Smilga Ja., Sisenis L. Productivity and quality of Hybrid aspen at the age of 18 years // *Research for Rural Development*, 2016, v. 2, pp. 55–61.
- [4] Rytter L., Rytter R-M. Productivity and sustainability of hybrid aspen (*Populus tremula* L. × *Populus tremuloides* Michx.) root sucker stands with varying management strategies // *Forest Ecology and Management*, 2017, v. 401, pp. 223–232. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.07.020
- [5] Stener L-G., Rungis D., Belevich V., Malm J. Change of clonal frequency in the second root sucker generation of hybrid aspen // *Forest Ecology and Management*, 2018, v. 408, pp. 174–182. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.10.034
- [6] Stener L.-G., Westin J. Early growth and phenology of hybrid aspen and poplar in clonal field tests in Scandinavia // *Silva Fennica*, 2017, v. 51, no. 3. Article id. 5656. DOI: 10.14214/sf.5656
- [7] Hytönen J., Beuker E., Viherä-Aarnio A. Clonal variation in basic density, moisture content and heating value of wood, bark and branches in hybrid aspen // *Silva Fennica*, 2018, vol. 52, no. 2. Article id. 9938. DOI: 10.14214/sf.9938
- [8] Федорков А.Л. Жизненное состояние и высота деревьев гибридной осины в клоновом архиве // *Лесоведение*, 2016. № 3. С. 195–198.
- [9] Бойцов А.К., Жигунов А.В., Григорьев А.А., Бондаренко А.С. Оценка перспективного использования клонов гибридных тополей и осины для плантационного лесовыращивания в условиях Северо-Запада России. // *Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы междунар. науч.-техн. конф. (Санкт-Петербург, 24–26 мая 2017 г.)*. Т. 1. СПб.: СПб-ГЛТУ, 2018. С. 40–43.
- [10] Tullus A., Rytter L., Tullus T., Weih M., Tullus H. Short-rotation forestry with hybrid aspen (*Populus tremula* L. × *Populus tremuloides* Michx.) in Northern Europe // *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2012, v. 27, pp. 10–29. DOI: 10.1080/02827581.2011.628949
- [11] Li B., Howe G. T., Wu R. Developmental factors responsible for heterosis in aspen hybrids (*Populus tremuloides* × *P. tremula*) // *Tree Physiology*, 1998, no. 18, pp. 29–36.
- [12] Ma H., Dong Y., Chen Z., Liao W., Lei B., Gao K., Li S., An X. Variation in the Growth Traits and Wood Properties of Hybrid White Poplar Clones // *Forests*, 2015, v. 6, pp. 1107–1120. DOI: 10.3390/f6041107
- [13] Царев А.П., Царева П.П., Царев В.А., Ленченкова О.Ю., Милигула Е.Н. Сортоиспытание и отбор гибридов тополя для полезащитных насаждений // *Лесотехнический журнал*, 2019. Т. 9. № 1 (33). С. 93–102.
- [14] Orlović S., Guzina V., Krstić B., Merkulo L. Genetic Variability in Anatomical, Physiological and Growth Characteristics of Hybrid Poplar (*Populus* × *euramericana* Dode (GUINIER)) and Eastern Cottonwood (*Populus deltoides* Bartr.) Clones // *Silvae Genetica*, 1998, v. 47, no. 5, pp. 183–190.
- [15] Al Afas N., Marrona N., Ceulemans R. Variability in *Populus* leaf anatomy and morphology in relation to canopy position, biomass production, and varietal taxon // *Ann. For. Sci.*, 2007, v. 64, pp. 521–532.
- [16] Свалов Н.Н. Вариационная статистика. М.: Лесная промышленность, 1977. 176 с.
- [17] Эзау К. Анатомия семенных растений. В 2 кн. Кн. 2. М.: Мир, 1980. 560 с.
- [18] Ivanov L.A., Ivanova L.A., Ronzhina D.A. Changes in the specific density of leaves of Eurasian plants along the aridity gradient // *Doklady Biological Sciences*, 2009, v. 428, no. 1, pp. 430–433.
- [19] Миракилов Х.М., Гиясидинов Б.Б., Абдуллаев Х.А., Каримов Х.Х., Солиева Б.А., Эргашева Э.А., Каспарова И.С. Удельная поверхностная плотность листа стародавних и современных сортов тонковолокнистого хлопчатника // *Доклады Академии наук Республики Таджикистан*, 2013. Т. 56, № 3. С. 250–255.
- [20] Придача В.Б., Новичонок Е.В., Николаева Н.Н., Иванова Д.С., Сазонова Т.А. Влияние аммонийного азота на морфофизиологические показатели двух форм *Betula pendula* (Betulaceae) // *Растительные ресурсы*, 2018. Т. 54, № 2. С. 213–235.

## Сведения об авторах

**Плюснина Светлана Николаевна** — канд. биол. наук, науч. сотр. Института биологии Коми НЦ УрО РАН, pljusnina@ib.komisc.ru

**Федорков Алексей Леонардович** — д-р. биол. наук, вед. науч. сотр. Института биологии Коми НЦ УрО РАН, fedorkov@ib.komisc.ru

Поступила в редакцию 02.10.2019.

Принята к публикации 13.12.2019.

# LEAF STRUCTURE OF EUROPEAN ASPEN *POPULUS TREMULA* L. AND HYBRID ASPEN *POPULUS TREMULA* L. × *POPULUS TREMULOIDES* MICHX.) (SALICACEAE) IN CLONE BANK

S.N. Plyusnina, A.L. Fedorkov

Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural branch of the RAS, 28, Kommunisticheskaya st., 167982, Syktyvkar, Russia

pljusnina@ib.komisc.ru

The article presents data on the size and anatomical structure of seven aspen hybrid clone leaf (*Populus tremula* L. × *Populus tremuloides* Michx.) and seven clones of the European aspen *Populus tremula* L. at the age of 10 years, growing in the clone bank at the Institute of Biology in the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (g. Syktyvkar, Komi Republic). It was shown that the leaf size of the hybrid exceeds the leaf size of the European aspen by 44,6 % ( $p < 0,0001$ ), and the leaf thickness by 8.8 % ( $p < 0,0001$ ). Morphometric data on cells and leaf tissues were obtained and analyzed, on the basis of which it was suggested that the increase in the morphological parameters of the aspen hybrid leaf relative to the parent breed is associated with an increase in the number of predominantly anticlinal cell divisions during leaf blade formation. It has been established that the thickness of the epidermis, columnar and spongy mesophyll, the height of columnar mesophyll cells and the number of rows of spongy mesophyll cells in the hybrid aspen leaf are statistically significantly greater than those of the European aspen.

**Keywords:** *Populus tremula* L., *Populus tremula* L. × *Populus tremuloides* Michx., clones, leaf area, leaf anatomy

**Suggested citation:** Plyusnina S.N., Fedorkov A.L. *Struktura lista osiny obyknovennoy Populus tremula L. i osiny gibridnoy (Populus tremula L. × Populus tremuloides Michx.) (Salicaceae) v klonovom arkhive* [Leaf structure of european aspen *Populus tremula* L. and hybrid aspen (*Populus tremula* L. × *Populus tremuloides* Michx.) (Salicaceae) in clone bank]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 2, pp. 23–28.  
DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-23-28

## References

- [1] Jansons A., Zeps M., Rieksts-Riekstīns J., Matisons R., Krišāns O. Height increment of hybrid aspen *Populus tremula* × *P. tremuloides* as a function of weather conditions in south-western part of Latvia. *Silva Fennica*, 2014, v. 48, no. 5. Article id. 1124. DOI: 10.14214/sf.1124
- [2] Pliūra A., Sushockas V., Sarsekova D., Gudynaite V. Genotypic variation and heritability of growth and adaptive traits, and adaptation of young poplar hybrids at northern margins of natural distribution of *Populus nigra* in Europe. *Biomass and Bioenergy*, 2014, vol. 70, pp. 513–529. DOI: 10.1016/j.biombioe.2014.09.011
- [3] Zeps M., Adamovics A., Smilga Ja., Sisenis L. Productivity and quality of Hybrid aspen at the age of 18 years. *Research for Rural Development*, 2016, v. 2, pp. 55–61.
- [4] Rytter L., Rytter R-M. Productivity and sustainability of hybrid aspen (*Populus tremula* L. × *Populus tremuloides* Michx.) root sucker stands with varying management strategies. *Forest Ecology and Management*, 2017, v. 401, pp. 223–232. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.07.020
- [5] Stener L-G., Rungis D., Belevich V., Malm J. Change of clonal frequency in the second root sucker generation of hybrid aspen. *Forest Ecology and Management*, 2018, v. 408, pp. 174–182. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.10.034
- [6] Stener L.-G., Westin J. Early growth and phenology of hybrid aspen and poplar in clonal field tests in Scandinavia. *Silva Fennica*, 2017, v. 51, no. 3. Article id. 5656. DOI: 10.14214/sf.5656
- [7] Hyttönen J., Beuker E., Viherä-Aarnio A. Clonal variation in basic density, moisture content and heating value of wood, bark and branches in hybrid aspen. *Silva Fennica*, 2018, vol. 52, no. 2. Article id. 9938. DOI: 10.14214/sf.9938
- [8] Fedorkov A. L. *Zhiznennoe sostoyanie i vysota derev'ev gibridnoy osiny v klonovom arkhive* [Vitality and height of quaking aspen trees in the clone aschive]. *Lesovedenie* [Forest science], 2016, no. 3, pp. 195–198.
- [9] Boytsov A.K., Zhigunov A.V., Grigoriev A.A., Bondarenko A.S. 2018. *Otsenka perspektivnogo ispol'zovaniya klonov gibridnykh topoley i osiny dlya plantatsionnogo lesovyrashchivaniya v usloviyakh Severo-Zapada Rossii* [Evaluation of the prospective use of hybrid poplar and aspen clones for plantation growing under conditions of North-West Russia]. *Les Rossii: politika, promyshlennost, nauka, obrazovaniye: Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii* [Forests of Russia: politics, industry, science, education: materials of the international scientific and technical conference], May 24–26, 2017, v. 1. St. Petersburg: SPbGLTU, 2018, pp. 40–43.
- [10] Tullus A., Rytter L., Tullus T., Weih M., Tullus H. Short-rotation forestry with hybrid aspen (*Populus tremula* L. × *Populus tremuloides* Michx.) in Northern Europe. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2012, v. 27, pp. 10–29. DOI: 10.1080/02827581.2011.628949
- [11] Li B., Howe G. T., Wu R. Developmental factors responsible for heterosis in aspen hybrids (*Populus tremuloides* × *P. tremula*). *Tree Physiology*, 1998, no. 18, pp. 29–36.
- [12] Ma H., Dong Y., Chen Z., Liao W., Lei B., Gao K., Li S., An X. Variation in the Growth Traits and Wood Properties of Hybrid White Poplar Clones. *Forests*, 2015, v. 6, pp. 1107–1120. DOI: 10.3390/f6041107
- [13] Tsarev A.P., Tsareva R.P., Tsarev V.A., Lenchenkova O.Yu., Miligula E.N. *Sortoispytanie i otbor gibridov topolya dlya polezashchitnykh nasazhdeniy* [Varietal testing and selection of poplar hybrids for shelterbelts] *Lesnoy vestnik / Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry magazine], 2019, t. 9, no. 1 (33), pp. 93–102.

- [14] Orlović S., Guzina V., Krstić B., Merkulov L. Genetic Variability in Anatomical, Physiological and Growth Characteristics of Hybrid Poplar (*Populus × euramericana* Dode (Guinier)) and Eastern Cottonwood (*Populus deltoides* Bartr.) Clones. *Silvae Genetica*, 1998, v. 47, no. 5, pp. 183–190.
- [15] Al Afas N., Marrona N., Ceulemans R. Variability in *Populus* leaf anatomy and morphology in relation to canopy position, biomass production, and varietal taxon. *Ann. For. Sci.*, 2007, v. 64, pp. 521–532.
- [16] Svalov N.N. *Variatsionnaya statistika* [Variation statistics]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest industry], 1977, p. 176.
- [17] Ezau K. *Anatomiya semennykh rasteniy* [Anatomy of seed plants]. Book 2. Moscow: Mir, 1980, 560 p.
- [18] Ivanov L.A., Ivanova L.A., Ronzhina D.A. Changes in the specific density of leaves of Eurasian plants along the aridity gradient. *Doklady Biological Sciences*, 2009, v. 428, no. 1, pp. 430–433.
- [19] Mirakilov Kh.M., Giyasidinov B.B., Abdullaev Kh. A., Karimov Kh.H., Solieva B.A., Ergasheva E.A., Kasparova I.S. *Udel'naya poverkhnostnaya plotnost' lista starodavnikh i sovremennykh sortov tonkovoloknistogo khlopchatnika* [Specific leaf weight of obsolete and modern longstaple cotton cultivars]. *Doklady Akademii nauk Respubliki Tadjikistan* [Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan], 2013, v. 56, no. 3, pp. 250–255.
- [20] Pridacha V.B., Novichonok E.V., Nikolaeva N.N., Ivanova D.S., Sazonova T.A. *Vliyanie ammoniy'nogo azota na morfofziologicheskie pokazateli dvukh form Betula pendula (Betulaceae)*. [Effects of ammonium nitrogen on morphophysiological parameters of two *Betula pendula* (Betulaceae) forms]. *Rastitel'nye resursy* [Plant resources], 2018, v. 54, no. 2, pp. 213–235.

## Authors' information

**Plyusnina Svetlana Nikolaevna** — Cand. Sci. (Biology), Researcher of the Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural branch of the Russian Academy of Sciences, pljusnina@ib.komisc.ru

**Fedorkov Alexey Leonardovich** — Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher of the Institute of Biology of Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, fedorkov@ib.komisc.ru

Received 02.10.2019.

Accepted for publication 13.12.2020.

## МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ МОНИТОРИНГОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

В.Г. Аковецкий<sup>1</sup>, А.В. Афанасьев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 65, корп. 1

<sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

geoinforisk@mail.ru

Предложена новая двухуровневая технология проведения комплексного мониторинга леса. Здесь на первом уровне осуществляется локальное зонирование территорий пожарной опасности, лесозащитное зонирование посредством классификационных индексов с многозональных космических изображений. На втором уровне наблюдения выделенных участков проводятся посредством детальных изображений высокого разрешения, получаемых беспилотными летательными аппаратами. Применение предложенной технологии дает возможность в большинстве случаев заменить съемку со станций наземного базирования на съемку с беспилотных летательных аппаратов, что существенно повышает производительность, точность и надежность проведения мониторинга.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, аэрокосмический мониторинг, спектральный индекс, геоинформационная среда, геоинформационная система

**Ссылка для цитирования:** Аковецкий В.Г., Афанасьев А.В. Методы и технологии интерпретации аэрокосмических мониторинговых наблюдений лесной растительности // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 2. С. 29–36. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-29-36

Одной из главных задач управления развитием лесного хозяйства является обеспечение интенсивного комплексного использования лесных ресурсов с сохранением их экологического и генетического потенциалов. Охрана, защита и воспроизводство лесов предполагает информационное сопровождение управления лесным комплексом и охраной природы всех уровней [1–3]. Для их решения, в частности, предусматривается проведение таких видов мониторинга как: *лесопожарный, лесопатологический и воспроизводства леса.*

*Лесопожарный мониторинг* включает в себя изучение пожарной опасности в лесах и предотвращение лесных пожаров посредством их обнаружения и учета на основе применения наземных, авиационных и космических систем. В результате его проведения принимаются управляющие решения по лесопожарным формированиям, пожарной технике и оборудованию.

*Лесопатологический мониторинг* предполагает наблюдения, анализ, оценку, прогноз санитарного и лесопатологического состояния леса посредством наземных и аэрокосмических съемок.

*Мониторинг воспроизводства лесов* предусматривает сбор и анализ информации о воспроизводстве лесов с помощью наземных, авиационных и космических средств. В результате его проведения определяются изменение площади земель под лесами и участков леса, требующих восстановления, характеристики лесных насаждений и эффективность воспроизводства лесов.

### Цель работы

Цель работы — проведение экспериментальной апробации методов и технологии двухуровневой интерпретации космических многозональных изображений и изображений, получаемых с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), в задачах комплексного мониторинга леса.

### Материалы и методы

Характерной особенностью рассмотренных выше видов мониторинга является использование дистанционных методов наземного, воздушного и космического базирования [4–6]. На основе системного комплексного подхода, сочетающего в себе оптимизацию технологий дистанционных полевых съемок и функциональную интерпретацию состояния растительности, вызванного хозяйственной деятельностью человека (вырубками) [7] и природными факторами (пожарами, засухой) [8–10].

Технологическая схема комплексного мониторинга леса включает в себя (рис. 1) следующие процессы:

- построение геоинформационной среды исследуемой территории;
- получение фотоизображений и их интерпретацию;
- информационное сопровождение управления лесным комплексом.

*Геоинформационная среда* исследуемой территории представляет собой совокупность геопространственных данных, обеспечивающих построение территориальных и объектно-ориен-



**Рис. 1.** Технологическая схема мониторинга леса  
**Fig. 1.** Technological forest monitoring scheme

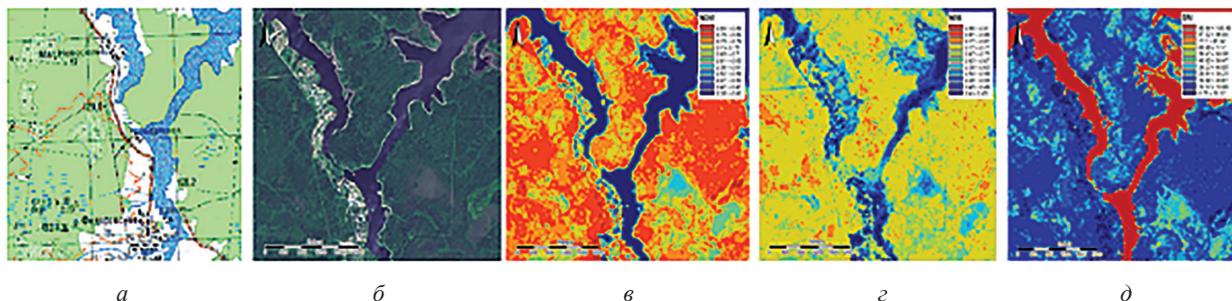
тированных моделей местности в геопозиционированном пространстве геоинформационных систем (ГИС). Она используется при комплексном решении задач разного уровня покрытия территории: планетарный, национальный, региональный, локальный и детальный. В рассматриваемом случае, геопространственные данные получают посредством систем глобального позиционирования ГЛОНАСС, GPS; спутников Landsat-7, 8 [13]; SPOT-6, 7 [14]; Pleiades-1, 2 [15]; Ресурс-П 1, 2, 3; наземного геодезического оборудования топографических съемок, оборудования БПЛА и топографических карт местности. В их перечень входят: цифровые топографические и геоботанические карты; архивные аэрофотоснимки, космические снимки, и цифровые изображения, получаемые по радиоканалам борта авиационных и космических беспилотных летательных аппаратов, а также цифровые изображения эталонов видов и состояния растительного покрова. Эти данные хранятся в базах данных ГИС и служат геопространственной основой для построения объектно-ориентированных моделей: лесного комплекса, источников природного (пожаров, засух, колоний жуков-короедов) и техногенного воздействия (вырубок, автодорог, инженерных построек, несанкционированных свалок). Они также используются для зонирования территорий и построения фоновых опорных моделей ее растительности.

Для получения текущей информации о состоянии лесного комплекса мониторинг выполняют посредством систем наземного, воздушного и космического базирования [11, 12].

В качестве систем наземного базирования используют комплексы измерительных станций, которые позволяют выполнять съемку в масштабе 1:100 — 1:10 000 в режимах цифровой измерительной фотокамеры, электронного тахеометра, лазерного сканера и станции глобального позиционирования (Leica Nova модели MS 50 и MS 60). Данные станции с успехом применяются для инвентаризации, создания фотоэталонов, определения фоновых параметров растительности (высоты, толщины, наименования вида).

В качестве систем воздушного базирования используются аэросъемочные системы, размещаемые на пилотируемых и беспилотных носителях. Для целей мониторинговых наблюдений целесообразно использовать архивные снимки и изображения, получаемые в ходе проведения оперативных съемок на заданный момент исследований в масштабе 1:100 — 1:100 000.

Космические изображения позволяют решать комплексные задачи, включающие отображение исследуемой территории как в различных масштабах (1:2000 — 1:1000 000), так и в различных спектральных диапазонах. Для этого широко применяются космические аппараты (КА) Landsat-7, Landsat-8 [13], SPOT-6, 7 [14], Pleiades-1, 2 [15], Ресурс-П 1, 2, 3.



**Рис. 2.** Зонирование пожароопасности территории по космическим изображениям с КА Landsat-8: *а* — опорная топографическая карта; *б* — цифровое цветное изображение; *в-д* — классификационные спектры исследуемой территории по индексам NDVI, NBR, BAI, соответственно

**Fig. 2.** Zoning of the fire hazard territory according to space images from the Landsat-8 spacecraft: *а* — reference topographic map; *б* — digital color image; *в-д* — classification spectra of the study area according to the NDVI, NBR, BAI indices, respectively



**Рис. 3.** Лесопатологическое и санитарное зонирование по изображениям с БПЛА DJI Phantom 4: *а* — зона леса (ель + береза); *б* — большие деревья; *в* — свалка мусора; *г* — вырубка леса

**Fig. 3.** Forest pathological and sanitary zoning according to images from UAV DJI Phantom 4: *а* — forest zone (spruce + birch); *б* — diseased trees; *в* — landfill; *г* — deforestation

Важное место в задачах мониторинговых наблюдений занимают методы и технологии интерпретации аэрокосмических изображений, выполняемые в визуальных, автоматизированных и автоматических режимах [1, 16]. Технологии интерпретации включают процессы: обнаружения, классификации, распознавания и векторизации состояния объектов растительности. Их эффективность определяется возможностью выделения интересующих индикаторов по изображениям местности. Данные технологии непосредственно связаны с параметрами съемочных камер, которые определяют пространственное и спектральное разрешение получаемых изображений местности.

Развитие технологий дистанционного зондирования позволяет сочетать космические и воздушные средства наблюдения, а также автоматические и визуальные режимы интерпретации, т. е. комплексные модели мониторинга.

Рассмотрим примеры практической апробации комплексного подхода интерпретации мониторинговых наблюдений при решении задач зонирования пожарной опасности, лесопатологического зонирования санитарного состояния лесов и зонирования воспроизводства лесного комплекса с помощью КА Landsat-7, Landsat-8,

архивных аэроснимков и текущих изображений исследуемой территории, полученных с БПЛА.

Разработкой ГИС-технологий космического мониторинга пожаров в Казахстане занимаются в Институте космических исследований с 2001 г., который с 2002 г. осуществляет оперативный космический мониторинг пожароопасных областей Казахстана. В процессе эксплуатации постоянно проводится совершенствование технологий с учетом реальных возможностей и потребностей Министерства чрезвычайных ситуаций, использующего эту информацию.

Разработанная интегрированная система космического мониторинга пожаров базируется на данных дистанционного зондирования NOAA AVHRR и EOS-AM Terra MODIS [17]. Она включает в себя комплекс ГИС-технологий, обеспечивающих: оперативное обнаружение очагов пожаров по космическим снимкам; их географическую привязку; оценку потенциальной опасности обнаруженных очагов; картирование площадей, пострадавших от пожаров; оценку потенциального ущерба сельскохозяйственных угодий от пожаров и риска пожароопасности различных территорий и моделирование развития пожаров по метеоданным.

Опыт практического применения спектральных индексов при обработке изображений пожароопасных территорий, полученных с КА Landsat-7 и SPOT-5, представлен в работе [18], в которой контроль правильности классификации проводился по опорным тестовым участкам, установленным в ходе наземных исследований.

Задачи мониторинга пожароопасности в рамках настоящей работы решались на основе классификации и последующего зонирования космических изображений, полученных с КА Landsat-8, которые отображали объекты растительного покрова в девяти спектральных диапазонах [13]. Классификация осуществлялась по трем индексам: NDVI, NBR, BAI (рис. 2).

*Нормализованный разностный вегетационный индекс* (NDVI) характеризует фотосинтез растений. Различное отражение в красном и ближнем инфракрасном каналах позволяет контролировать относительную «зеленость» растительности по спектральному отражению солнечной радиации. Благодаря этому свойству по данному индексу классифицируются зоны пожарной опасности, поскольку повышенные значения температуры почвы и воздуха приводят к дефициту влаги, что, в свою очередь, обуславливает пожелтение листы растительности и ее увядание. Индекс фиксирует изменение цветовых характеристик растительности, снижающих отражение солнечной энергии в ближнем инфракрасном диапазоне. Его значение вычисляется по формуле [19]

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED},$$

где NIR — значения пикселей ближнего инфракрасного (ИК) канала;

RED — значения пикселей красного канала.

*Нормализованный индекс гарей* (NBR) предназначен для характеристики территорий, на которых был пожар. Это уточненный показатель термальной активности территории. Он адаптирован к использованию изображений, полученных с КА Landsat, с несколькими ИК-каналами. Для расчета используется ближний и коротковолновый ИК-диапазоны. Его значение определяется по уравнению [20]

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR},$$

где NIR — значения пикселей ближнего ИК-канала;

SWIR — значения пикселей из коротковолнового ИК-канала.

По *индексу выгоревших областей* (BAI) проводится анализ гарей и оценка их общего состояния на основании различия в отражательной способности в красной и ближней ИК-области спектра.

Его значение можно вычислить по формуле [21]

$$BAI = \frac{1}{(0,1 - RED)^2 + (0,06 - NIR)^2},$$

где RED — значения пикселей красного канала;

NIR — значения пикселей из ближнего ИК-канала.

## Результаты и обсуждение

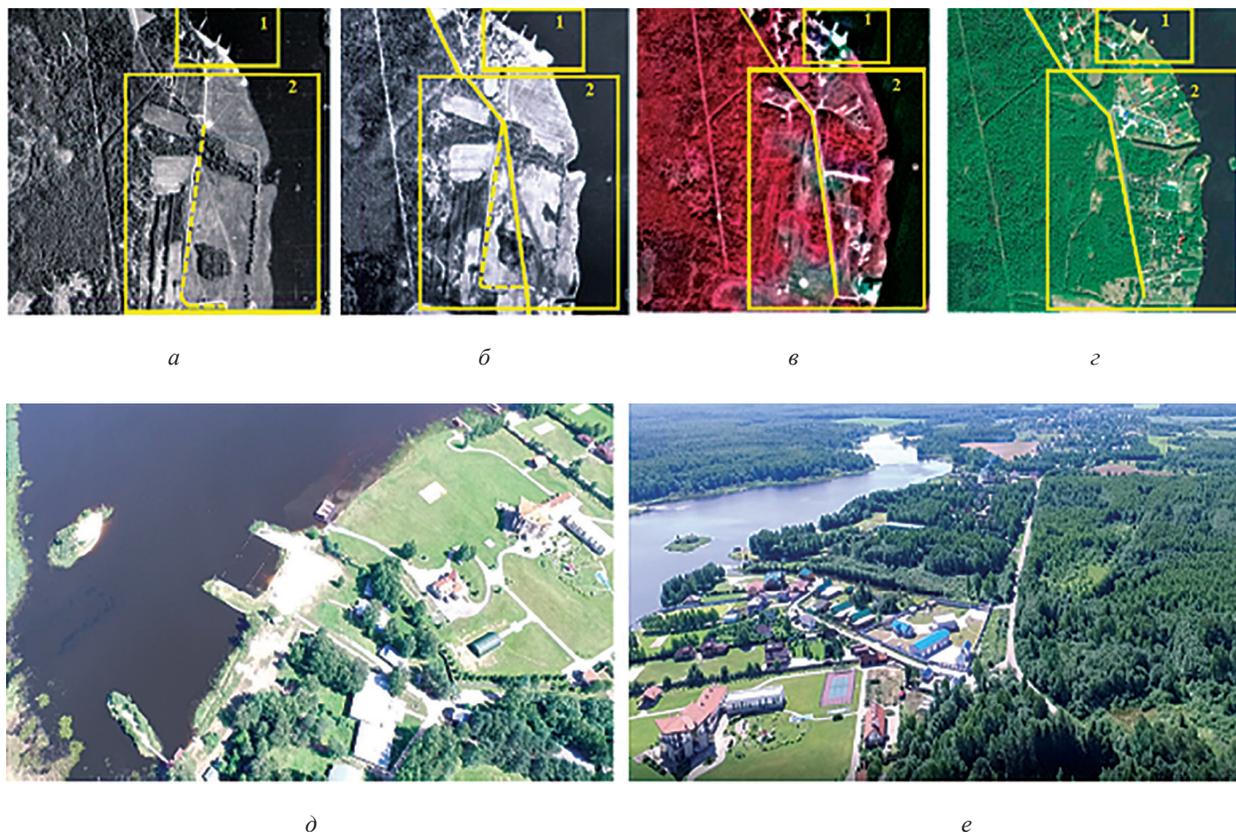
Классификация и зонирование территории (Тверская область, Конаковский район, Ивановское водохранилище) выполнялись на программном комплексе АГИР-ТМ, который зонировал территории в автоматическом и автоматизированном режимах (см. рис. 2, а–д).

Поскольку в 2017 г. опасность природных пожаров на исследуемой территории отсутствовала, данная классификация была использована для лесопатологического зонирования территории (рис. 3). На основе использования индекса NDVI были выделены участки территории леса, где были обнаружены значительные значения коэффициента, на уровне 0,84–0,89. Детальные изображения этих участков, полученные с борта БПЛА, позволили выделить участки (показаны в виде окружностей красного цвета): больных сухих деревьев (см. рис. 3, б); территорию на лесной поляне, где находилась несанкционированная свалка бытовых отходов (см. рис. 3, в); территорию, где находилась вырубка деревьев (см. рис. 3, г). Значения коэффициента 0,69–0,79 соответствовали участкам смешанного лесного массива здоровых деревьев (ель, береза) (см. рис. 3, а).

Важной задачей мониторинга лесного комплекса является зонирование воспроизводства лесов. Для ее решения использовались: аэроснимки территории 1982 г. (рис. 4, а) и 1990 г. (см. рис. 4, б), космический снимок территории с КА Landsat-7, 2002 г. (см. рис. 4, в) и с КА Landsat-8, 2017 г. (см. рис. 4, г), изображения территории, полученные с БПЛА (см. рис. 4, д и 4, е).

Следует также отметить, что коттеджные участки на исследуемой территории ограждены забором, который препятствует свободному доступу к Ивановскому водохранилищу. На участке 1 зафиксировано незначительное увеличение растительного покрова вдоль границы с коттеджным участком.

Временной анализ снимков показал, что на участке 2 в период с 1982 г. по 1990 г. была проложена автодорога (сплошная желтая линия — рис. 4, б–г), которая пересекла островные участки лесного массива. С ее вводом старая полевая автодорога (штриховая желтая линия — рис. 4, в, г) покрылась лесным массивом и в настоящее время практически неразличима на изображениях.



**Рис. 4.** Комплексные мониторинговые наблюдения воспроизводства лесного комплекса: *a* — аэроснимок, 1982 г.; *б* — аэроснимок, 1990 г.; *в* — снимок с КА Landsat-7, 2002 г.; *г* — снимок с КА Landsat-8, 2017 г.; *д* — участок 1, изображение с БПЛА, 2017 г.; *е* — участок 2, изображение с БПЛА, 2017 г.

**Fig. 4.** Complex monitoring of the reforestation: *a* — aerial photograph, 1982; *б* — aerial photograph, 1990; *в* — image from Landsat-7 spacecraft, 2002; *г* — image from the Landsat-8 spacecraft, 2017; *д* — plot 1, image from a UAV, 2017; *е* — section 2, image from a UAV, 2017

За промежуток времени с 1990 г. по 2017 г. на исследуемой территории активно проводилось коттеджное строительство. Вдоль береговой линии водохранилища наблюдаются посадки молодых деревьев, которые выполняют роль береговой защиты.

Комплексные наблюдения показали, что на исследуемой территории, расположенной в Тверской области, общее состояние лесного массива находится в хорошем состоянии. Только на отдельных участках встречаются отдельные нарушения санитарного режима состояния лесных земель, связанные с влиянием коттеджного строительства и отсутствием достаточной инфраструктуры утилизации отходов.

### Выводы

Результаты практической апробации предложенной технологии двухуровневой интерпретации космических изображений и изображений, полученных авиационными БПЛА, показали эффективность предложенного подхода. Он позволяет по многоспектральным космическим изображениям мелкого масштаба осуществлять

качественное комплексное зонирование территории посредством лесопожарного, лесопатологического и санитарного мониторинга. Эффективность применения современных БПЛА зависит от площади проведения работ и выбора места их запуска. Наличие локальных участков предстоящих исследований позволяет оптимизировать временные и финансовые затраты по их проведению. Важным моментом при реализации данного подхода является применение процедур автоматической и автоматизированной интерпретации изображений интересующих объектов, как по космическим снимкам, так и по снимкам, получаемым с помощью БПЛА. Наличие автоматического режима принятия решений позволяет приступить к разработке цифровых геоинформационных платформ четвертого поколения, основанных на сетевых решениях и искусственном интеллекте в задачах проведения мониторинговых наблюдений критических зон на территории земной поверхности. Это становится особенно важно в связи с изменением климата и возрастанием роли воздействия природных факторов на состояние окружающей среды.

## Список литературы

- [1] Рязанцева Н.Е., Аковецкий В.Г., Зубалий А.М., Бурикова Ю.Н., Гайкович Б.А., Занин В.Ю., Шокина О.И. Методы экологических исследований. М.: ИНФРА-М, 2019. 474 с.
- [2] Хамедов В.А., Мазуров Б.Т. Разработка методических вопросов создания системы спутникового мониторинга состояния лесных экосистем в условиях воздействия нефтегазового комплекса территории Западной Сибири // Вестник СГУГиТ, 2015. Вып. 3 (31). С. 16–31.
- [3] Мазуров Б.Т., Аврунев Е.И., Хамедов В.А. Оперативный мониторинг лесных земель северных регионов на основе использования оптических и радарных космических снимков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2017. Т. 14. № 4. С. 103–111.
- [4] Бахтинова Е.В., Соколов А.Ю., Никольский Д.Б., Кантемиров Ю.И. Полуавтоматическое выявление вырубок леса на мультивременных радарных и радарно-оптических цветных композитах // Геоматика, 2012. № 1. С. 52–55.
- [5] Хамедов В.А. Мониторинг состояния лесных экосистем в условиях воздействия нефтегазового комплекса // Решетневские чтения, 2013. Т. 2. С. 265–267.
- [6] Хамедов В.А. Сравнение методов обнаружения лесных гарей по оптическим и радиолокационным снимкам // Вестник СГУГиТ, 2016. Вып. 3 (35). С. 43–54.
- [7] Хамедов В.А., Мазуров Б.Т. Оценка точности определения площадей лесных рубок с использованием снимков с российского космического аппарата «Ресурс-П» № 1 // Вестник СГУГиТ, 2015. Вып. 4 (32). С. 42–50.
- [8] Брыксин В.М., Евтюшкин А.В., Еремеев А.В., Макаева М.А., Хамедов В.А. Автоматизированная система спутникового мониторинга пожарной обстановки в технологических коридорах трубопроводов и лесах ХМАО // Оптика атмосферы и океана, 2009. Т. 22. № 1. С. 90–95.
- [9] Копылов В.Н., Полищук Ю.М., Хамедов В.А. Геоинформационная технология оценки последствий лесных пожаров с использованием данных дистанционного зондирования // Геоинформатика, 2006. № 1. С. 56–61.
- [10] Копылов В.Н., Хамедов В.А. Информационная технология оперативного обнаружения лесных пожаров // Материалы науч.-практ. семинара «Проблемы природной безопасности Югры: мониторинг и прогнозирование экстремальных гидрометеорологических явлений и лесных пожаров» (Ханты-Мансийск, 9–10 июня 2008 г.). Ханты-Мансийск: ОАО «Информационно-издательский центр», 2008. С. 18–23.
- [11] Аковецкий В.Г. Аэрокосмический мониторинг месторождений нефти и газа. М.: Недра-Бизнесцентр, 2008, 454 с.
- [12] Украинский П.А. Динамика спектральных свойств зарастающих травяных гарей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2013. Т. 10. № 4. С. 229–238.
- [13] Zanter K. Landsat 8 (L8) Data Users Handbook. Sioux Falls, South Dakota: EROS, 2016, 106 p.
- [14] Coeurdevey L., Soubirane J. SPOT 6/7 Imagery // User Guide, 2013, July 8, 120 p.
- [15] Coeurdevey L., Gabriel-Robez C., Pléiades Imagery // User Guide, 2012, October 18, 118 p.
- [16] Курбанов Э.А. Решение вопросов космического мониторинга лесных гарей в комплексных пакетах ENVI и ArcGIS // Геоматика, 2012. № 4. С. 82–92.
- [17] Архипкин О.П., Спивак Л.Ф., Сагатдинова Г.Н. Пятилетний опыт оперативного космического мониторинга пожаров в Казахстане // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2007. Т. 1. С. 103–110.
- [18] Бартаев С.А., Егоров В.А., Крылов А.М., Стыщенко Ф.В., Ховратович Т.С. Исследование возможностей оценки состояния поврежденных пожарами лесов по данным многоспектральных спутниковых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2010. Т. 7. № 3. С. 215–225.
- [19] Rouse J.W., Haas R.H., Scheel J.A., Deering D.W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS // Proceedings 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium, 1974, vol. 1, p. 48–62.
- [20] Key C.H., Benson N. Landscape Assessment: Ground measure of severity, the Composite Burn Index; and Remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio // Firemon: Fire Effects Monitoring and Inventory System. Ogden, UT: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2006, pp. 1–51.
- [21] Chuvieco E., Pilar M.M., Palacios A. Assessment of different spectral indices in the red-nearinfrared spectral domain for burned land discrimination // Remote Sensing of Environment, 2002, v. 112, pp. 2381–2396.

## Сведения об авторах

**Аковецкий Виктор Геннадьевич** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Геоэкология» РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, [geoinform@mail.ru](mailto:geoinform@mail.ru)

**Афанасьев Алексей Викторович** — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), [afanasyev-av@yandex.ru](mailto:afanasyev-av@yandex.ru)

Поступила в редакцию 14.10.2019.

Принята к публикации 17.01.2020.

## METHODS AND TECHNOLOGIES FOR FOREST VEGETATION AEROSPACE MONITORING INTERPRETATION

V.G. Akovetsky<sup>1</sup>, A.V. Afanasyev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Gubkin Oil and Gas University (NRU) Gubkina, 65, Leninsky av., 119991, Moscow, Russia

<sup>2</sup>BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

geoinforisk@mail.ru

A new two-level technology for integrated forest monitoring is proposed. Here, at the first level, local zoning of fire hazard areas, forest protection zoning by means of classification indices from multizone space images is carried out. At the second level, observations of the selected areas are carried out through high-resolution detailed images obtained by unmanned aerial vehicles. The application of the proposed technology makes it possible in most cases to replace the survey from ground-based stations with the survey from unmanned aerial vehicles, which significantly increases the performance, accuracy and reliability of monitoring.

**Keywords:** remote sensing, aerospace monitoring, spectral index, geo-information environment, geographic information system

**Suggested citation:** Akovetsky V.G., Afanasyev A.V. *Metody i tekhnologii interpretatsii aerokosmicheskikh monitoringovykh nablyudeniy lesnoy rastitel'nosti* [Methods and technologies for forest vegetation aerospace monitoring interpretation]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 2, pp. 29–36. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-29-36

### References

- [1] Ryazantseva N.E., Akovetsky V.G., Zubaliy A.M., Burnikova Yu.N., Gaykovich B.A., Zanin V.Yu., Shokina O.I. *Metody ekologicheskikh issledovaniy* [Environmental research methods]. Moscow: INFRA-M, 2019, 474 p.
- [2] Khamedov V.A., Mazurov B.T. *Razrabotka metodicheskikh voprosov sozdaniya sistemy sputnikovogo monitoringa sostoyaniya lesnykh ekosistem v usloviyakh vozdeystviya neftegazovogo kompleksa territorii Zapadnoy Sibiri* [Development of methodological issues of creating a satellite monitoring system for the state of forest ecosystems under the influence of the oil and gas complex in Western Siberia]. *Vestnik SGUGiT*, 2015, iss. 3 (31), pp. 16–31.
- [3] Mazurov B.T., Avrunev E.I., Khamedov V.A. *Operativnyy monitoring lesnykh zemel' severnykh regionov na osnove ispol'zovaniya opticheskikh i radarnykh kosmicheskikh snimkov* [Operational monitoring of forest lands in the northern regions based on the use of optical and radar satellite images]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space], 2017, v. 14, no. 4, pp. 103–111.
- [4] Bakhtinova E.V., Sokolov A.Yu., Nikol'skiy D.B., Kantemirov Yu.I. *Poluavtomaticheskoe vyyavlenie vyrubok lesa na mul'tivremennykh radarnykh i radarno-opticheskikh tsvetnykh kompozitakh* [Semi-automatic detection of deforestation on multi-time radar and radar-optical color composites]. *Geomatika*, 2012, no. 1, pp. 52–55.
- [5] Khamedov V.A. *Monitoring sostoyaniya lesnykh ekosistem v usloviyakh vozdeystviya neftegazovogo kompleksa* [Monitoring the state of forest ecosystems under the influence of the oil and gas complex]. *Reshetnevskie chteniya* [Reshetnev readings], 2013, v. 2, pp. 265–267.
- [6] Khamedov V.A. *Sravnienie metodov obnaruzheniya lesnykh garey po opticheskim i radiolokatsionnym snimkam* [Comparison of methods for detecting forest burns by optical and radar images]. *Vestnik SGUGiT*, 2016, iss. 3 (35), pp. 43–54.
- [7] Khamedov V.A., Mazurov B.T. *Otsenka tochnosti opredeleniya ploshchadey lesnykh rubok s ispol'zovaniem snimkov s rossiyskogo kosmicheskogo apparata «Resurs-P» № 1* [Evaluation of the accuracy of determining the area of forest felling using images from the Russian spacecraft Resource-P No. 1]. *Vestnik SGUGiT*, 2015, iss. 4 (32), pp. 42–50.
- [8] Bryksin V.M., Evtuyushkin A.V., Ereemeev A.V., Makeeva M.A., Khamedov V.A. *Avtomatizirovannaya sistema sputnikovogo monitoringa pozharной obstanovki v tekhnologicheskikh koridorakh truboprovodov i lesakh KhMAO* [Automated system for satellite monitoring of the fire situation in the technological corridors of pipelines and forests of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug]. *Optika atmosfery i okeana* [Optics of the atmosphere and ocean], 2009, v. 22, no. 1, pp. 90–95.
- [9] Kopylov V.N., Polishchuk Yu.M., Khamedov V.A. *Geoinformatsionnaya tekhnologiya otsenki posledstviy lesnykh pozharov s ispol'zovaniem dannykh distantsionnogo zondirovaniya* [Geoinformation technology for assessing the consequences of forest fires using remote sensing data]. *Geoinformatika* [Geoinformatics], 2006, no. 1, pp. 56–61.
- [10] Kopylov V.N., Khamedov V.A. *Informatsionnaya tekhnologiya operativnogo obnaruzheniya lesnykh pozharov* [Information technology for operational detection of forest fires] *Materialy nauch.-prakt. seminarov «Problemy prirodnoy bezopasnosti Yugry: monitoring i prognozirovaniye ekstremal'nykh gidrometeorologicheskikh yavleniy i lesnykh pozharov»* [Materials scientific.-practical. Seminar «Problems of Natural Security of Ugra: Monitoring and Forecasting of Extreme Hydrometeorological Phenomena and Forest Fire»] Khanty-Mansiysk, June 9–10, 2008. Khanty-Mansiysk: OJSC «Information and Publishing Center», 2008, pp. 18–23.
- [11] Akovetsky V.G. *Aerokosmicheskyy monitoring mestorozhdeniy nefiti i gaza* [Aerospace monitoring of oil and gas fields]. Moscow: Nedra Business Center, 2008, 454 p.
- [12] Ukrainskiy P.A. *Dinamika spektral'nykh svoystv zarastayushchikh travyanykh garey* [Dynamics of the spectral properties of overgrown grass burns]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space], 2013, v. 10, no. 4, pp. 229–238.
- [13] Zanter K. Landsat 8 (L8) Data Users Handbook. Sioux Falls, South Dakota: EROS, 2016, 106 p.
- [14] Coeurdevey L., Soubirane J. SPOT 6/7 Imagery. User Guide, 2013, July 8, 120 p.
- [15] Coeurdevey L., Gabriel-Robez C., Pléiades Imagery. User Guide, 2012, October 18, 118 p.

- [16] Kurbanov E.A. *Reshenie voprosov kosmicheskogo monitoringa lesnykh garey v kompleksnykh paketakh ENVI i ArcGIS* [The solution of issues of space monitoring of forest burns in integrated packages ENVI and ArcGIS]. *Geomatika*, 2012, no. 4, pp. 82–92.
- [17] Arkhipkin O.P., Spivak L.F., Sagatdinova G.N. *Pyatiletniy opyt operativnogo kosmicheskogo monitoringa pozharov v Kazakhstane* [Five-year experience of operational space-based fire monitoring in Kazakhstan]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space], 2007, v. 1, pp. 103–110.
- [18] Bartalev S.A., Egorov V.A., Krylov A.M., Stytsenko F.V., Khovratovich T.S. *Issledovanie vozmozhnostey otsenki sostoyaniya povrezhdennykh pozharami lesov po dannym mnogosppektral'nykh sputnikovyykh izmereniy* [Investigation of the possibilities of assessing the state of forests damaged by fires according to multispectral satellite measurements]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space], 2010, v. 7, no. 3, pp. 215–225.
- [19] Rouse J.W., Haas R.H., Scheel J.A., Deering D.W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium*, 1974, v. 1, pp. 48–62.
- [20] Key C.H., Benson N. Landscape Assessment: Ground measure of severity, the Composite Burn Index; and Remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio. *Firemon: Fire Effects Monitoring and Inventory System*. Ogden, UT: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2006, pp. 1–51.
- [21] Chuvieco E., Pilar M.M., Palacios A. Assessment of different spectral indices in the red-nearinfrared spectral domain for burned land discrimination. *Remote Sensing of Environment*, 2002, v. 112, pp. 2381–2396.

## Authors' information

**Akovetskiy Viktor Gennad'evich** — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Department «Geoecology» of the National University of Oil and Gas «Gubkin University», [geoinforisk@mail.ru](mailto:geoinforisk@mail.ru)

**Afanas'ev Aleksey Viktorovich** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), [afanasyev-av@yandex.ru](mailto:afanasyev-av@yandex.ru)

Received 14.10.2019.

Accepted for publication 17.01.2020.

## АЛЛЕЛОТОКСИЧНОСТЬ ПОЧВ, МЕХАНИЗМЫ ЕЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ СНИЖЕНИЯ

Г.Н. Федотов<sup>1, 2</sup>, В.С. Шалаев<sup>2</sup>, Ю.П. Батырев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 12, Факультет почвоведения, МГУ

<sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

gennadiy.fedotov@gmail.com

Рассмотрено явление аллелотоксичности почв и его негативное влияние на развитие растений. Показано, что исследование химического состава почв не позволяет однозначно определять наличие аллелотоксичности у почв и ее величину. Поэтому для изучения аллелотоксичности почв необходимо использовать методы биотестирования. Установлено, что использование для борьбы с аллелотоксичностью почв только севооборотов не позволяет полностью решить проблему почвоутомления. Сделан вывод о том, что для снижения аллелотоксичности почв необходимо разработать методы, в основе которых может лежать снижение концентрации аллелотоксинов в почвах путем активации развития микроорганизмов, способных использовать аллелотоксины в качестве источников углерода, или закрепление аллелотоксинов (снижение их активности) в гумусовой матрице почвенных гелей.

**Ключевые слова:** аллелотоксичность почв, ингибирование почвами развития проростков семян, снижение аллелотоксичности, микроорганизмы, гумусовая матрица почвенных гелей и закрепление в ней аллелотоксинов

**Ссылка для цитирования:** Федотов Г.Н., Шалаев В.С., Батырев Ю.П. Аллелотоксичность почв, механизмы ее возникновения и возможные пути снижения // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 2. С. 37–42. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-37-42

Негативное влияние почв на развитие растений известно давно [1–3]. Обусловлено оно накоплением в почвах аллелотоксинов [2, 4–8] вследствие их высокой сорбционной способности. Известны различные пути поступления в почву аллелотоксинов. Отметим, что растения используют химические вещества для борьбы со стрессовыми воздействиями и конкурентами [1, 9–11]. В процессе эволюции растения стали самостоятельно вырабатывать универсальные вещества, предназначенные для преодоления негативных воздействий. Их проявление во время вегетации обуславливает усиление выработки растениями аллелотоксинов, выделение их, а следовательно, повышение аллелотоксичности почв [8, 12, 13]. Аллелотоксины также вырабатывают микроорганизмы, разлагающие растительные остатки [2, 3, 11, 14, 15], кроме того, они выделяются из растительных остатков при их разложении в почвах [1, 7, 16], выделяются фитопатогенами [16], а к их появлению в почвах приводят и воздействия, изменяющие микробиологический состав почв [6, 17]. Аллелотоксичность почв усиливается при избыточном использовании минеральных удобрений [14, 15].

Перечисленные явления широко распространены. В ходе исследования нескольких тысяч образцов подзолистых почв установлено, что практически все они аллелотоксичны [2].

Природа аллелотоксинов весьма разнообразна. Среди них были обнаружены следующие: простые водорастворимые органические кислоты; спирты с неразветвленной цепью; алифатические

альдегиды и кетоны; простые ненасыщенные лактоны; жирные кислоты с длинной цепью; нафтохиноны, антрахиноны и сложные хиноны; терпеноиды и стероиды; простые фенолы; бензойная кислота и ее производные; коричная кислота и ее производные; кумарины; флавоноиды; танины; аминокислоты и полипептиды; алколоиды и циангидрины; сульфиды и гликозиды горчичного масла; пурины и нуклеозиды — 14 групп химических соединений [18].

Исследование химического состава почв не позволяет однозначно определять наличие аллелотоксичности у почв и ее величину. Во-первых, как показано выше, соединений, которые могут ингибировать развитие растений достаточно много, что делает количественный анализ содержания этих веществ в почвах трудновыполнимой задачей. Во-вторых, токсины закреплены в почвах (прежде всего, в органическом веществе почв) связями с сильно отличающейся энергией [1]. В результате практически невозможно определить, какая часть молекул, находящихся в почве аллелотоксинов, будет оказывать негативное влияние на растения, а к каким из них растения будут нечувствительны. В-третьих, аллелотоксины во многих случаях представляют собой смесь различных веществ, причем концентрация каждого из компонентов смеси может быть ниже порога ингибирования (обнаруживаемые в почвах концентрации индивидуальных аллелотоксинов, как правило, ниже порога ингибирования [6]), а суммарное угнетение может быть очень сильным [11]. В-четвертых, некоторые из веществ сами

по себе не являются токсичными (сахара), но значительно усиливают действие токсинов [7]. В связи с перечисленными проблемами получения значимой информации методами химического анализа основными способами изучения аллелотоксичности почв являются методы биотестирования [1, 5, 6, 9–11].

Эффекты ингибирования аллелотоксинами особенно сильно влияют на прорастание семян и развитие из них растений [4, 7], поэтому аллелотоксичность почв, как правило, изучали, ориентируясь на прорастание семян. Наиболее распространено изучение влияния вытяжек из почв на развитие семян [1, 5, 11], но существуют методы оценки аллелотоксичности почв с помощью набора тест-культур [19].

Первая группа методов фактически позволяет на качественном уровне получить ответ на вопрос о наличии аллелотоксичности. Однако переход аллелотоксинов из почвы в вытяжку с последующим воздействием вытяжки на семена может не соответствовать воздействию аллелотоксинов на семена, прорастающие в почвах, содержащих эти токсины.

Метод тест-культур тоже имеет свои ограничения вследствие того, что растения обладают разной толерантностью к аллелотоксинам [9, 10] и, установив степень аллелотоксичности почв на тестовых объектах, невозможно предсказать поведение конкретных культур на этих почвах.

Эти недостатки были преодолены в методике [20], позволяющей определять ингибирование прорастания и развития семян в изучаемых почвах по сравнению с инертным субстратом — песком при влажностях, обеспечивающих оптимальные водно-воздушные условия песка и почв, по суммарной длине проростков больших массивов семян (1000...1200 шт.).

В настоящее время можно выделить следующие основные направления исследований по аллелопатии в мировой науке: изучение аллелопатического влияния одних растений на другие [9, 10, 21–23]; изучение состава выделяемых аллелотоксинов [7, 8, 12, 13]; поиск аллелотоксинов для применения их в качестве гербицидов [24, 25]; использование аллелопатии в сельском хозяйстве [12, 26, 27].

За последние годы внимание к аллелопатии существенно возросло, поскольку она во многом определяет возможность получения высоких урожаев сельскохозяйственных культур. Считают, что до 25 % урожаев теряется в результате аллелотоксичности почв [5].

Однако очень трудно доказать, что накопление в почвах аллелотоксинов является непосредственной причиной почвоутомления [1]. Связано это с тем, что негативное влияние аллелотоксинов на

растения происходит очень постепенно и на начальном этапе его трудно заметить. Ослабленные растения теряют стойкость к холоду или засухе, в них резко снижается иммунитет к фитопатогенам и вредителям, а также уменьшается конкурентоспособность по отношению к сорнякам. В этих условиях болезни, вредители, сорняки начинают активно развиваться. Они хорошо заметны, поэтому именно их принимают за истинную причину почвоутомления, тогда как они являются лишь реакцией экосистемы на наличие почвенной аллелотоксичности. Подавление болезней и вредителей, борьба с сорняками часто не дают нужных результатов, так как не устраняется причина — наличие в почве аллелотоксинов [1].

Неоднократно предпринимались попытки снижения аллелотоксичности почв с помощью их промывания большим количеством воды [2] или органических растворителей [3], промораживания, автоклавирования и известкования [2], а также почвы прогревали и вносили в них навоз [1].

Некоторые исследователи, работающие в области изучения аллелопатии почв, пришли к выводу, что аллелотоксичность почв способны снижать микроорганизмы, которые используют аллелотоксины в качестве источников углерода для своего питания [1, 11–13, 18, 28, 29]. Однако понять механизм снижения аллелотоксичности и получить воспроизводимые результаты по ее снижению даже в лабораторных экспериментах до настоящего времени не удалось. В одних случаях используемые приемы давали положительный эффект, а в других — нет.

## Объекты и методы исследований

Таким образом, в аллелопатии накоплен большой объем важной и разнообразной информации, но решающий шаг к пониманию механизма ее снижения и созданию на этой основе методов, которые реально можно использовать в сельскохозяйственном производстве, до сих пор не сделан. Единственное предложение по результатам исследований, не вызывающее сомнений, состоит в необходимости применения севооборотов [5, 6], которые уменьшают поступление аллелотоксинов в почву, снижая тем самым ее аллелотоксичность. Тем не менее такой подход применим только к выращиванию полевых культур. Возможность его использования в садоводстве, овощеводстве, цветоводстве, защищенном грунте сомнительна. Применение севооборотов не позволяет также активно влиять на состояние почв, обеспечивая их восстановление (снижение аллелотоксичности) быстрыми темпами, в которых часто нуждаются различные отрасли сельского хозяйства.

Для решения этой проблемы, на наш взгляд, надо исходить из того, что аллелотоксичность

почв определяется двумя независимыми факторами — концентрацией аллелотоксинов в почвах и прочностью их связей. Выше перечислены механизмы накопления аллелотоксинов в почвах, но при одной и той же концентрации аллелотоксинов ингибирующая способность почв может значительно отличаться. Как следствие, появляется необходимость отдельно рассматривать два направления снижения аллелотоксичности почв: путем снижения концентрации в почвах аллелотоксинов и снижения активности аллелотоксинов, содержащихся в почвах.

Удаление аллелотоксинов из почв в естественных условиях может происходить в результате стока с водой при промывном режиме или взаимодействия и преобразования при химических реакциях, а также при использовании микроорганизмами почв аллелотоксинов в качестве источников углерода. Применение первых двух подходов для освобождения почв от аллелотоксинов не гарантирует положительный результат. Поэтому имеет смысл основное внимание обратить на разработку методов, основанных на использовании микроорганизмами почв аллелотоксинов в качестве источников углерода.

Подобные методы должны быть основаны на увеличении соотношения: почвенные микроорганизмы / содержание в почвах источников углерода. Следовательно, введение в почву источников углеродного питания для микроорганизмов не может дать положительного результата, поскольку величина соотношения при этом будет не возрастать, а снижаться. Остается два пути: введение в почву навоза, содержащего множество микроорганизмов, или стимуляция развития почвенных микроорганизмов без внесения в почву для них источников углеродного питания. Первый путь активно используется и его эффективность хорошо известна. Однако количество навоза, которое необходимо вносить в почву для достижения желаемого результата — велико, а его доступность в связи с резким сокращением поголовья крупного рогатого скота в России — мала. Второй путь в настоящее время практически не используется. Исключением может стать предпосевная обработка семян препаратом «Альбит», основой которого является полибетагидроксимасляная кислота, стимулирующая рост бактерий.

Проблема закрепления аллелотоксинов в почвах является достаточно сложной, поскольку почвы нельзя рассматривать как обычные твердые сорбенты. Они имеют значительно более сложную структурную организацию. Почва представляет собой систему, образованную частицами различного размера, которые связаны почвенными гелями [30]. Основой этих почвенных гелей служит гумусовая матрица, образованная части-

цами гумусовых веществ размером 2...10 нм [30]. Поверхность частиц гумусовых веществ мозаична и состоит из гидрофильных и гидрофобных участков. При большом содержании воды в почве в подобных системах термодинамически выгодно образование связей между частицами гумусовых веществ через гидрофобные участки, а при малом содержании воды в почве — через гидрофильные участки (аналогия с поведением дифильных молекул поверхностно-активных веществ и образованием из них мицелл). Логично предположить [31], что в определенном интервале влажностей почв должен происходить структурный переход от связей частиц гумусовых веществ через гидрофобные участки поверхности к связям через гидрофильные участки. Показано [31, 32], что в результате подобного структурного перехода скачкообразно изменяются некоторые свойства почв.

Связь данного явления с аллелотоксичностью почв состоит в том, что, во-первых, структурный переход определяется не только влажностью почв и температурой, но и гидрофильно-гидрофобными характеристиками гумусовой матрицы, которые могут изменяться под влиянием вносимых в почву веществ. Так, многозарядные катионы могут увеличивать долю гидрофобности частиц гумусовых веществ, так же, как и сорбция на этих частицах органических молекул, имеющих большие гидрофобные участки. Во-вторых, в результате структурного перехода изменяются сорбционные свойства почв. При контакте частиц гумусовых веществ через гидрофобные участки должна уменьшаться доступность органических молекул, сорбированных на этих участках.

Из изложенного выше следует, что почва не является простым твердым сорбентом с определенной сорбционной емкостью и набором энергий связи адсорбата с адсорбентом. В результате структурного перехода ее сорбционные свойства могут претерпевать значительные изменения. Это не только накладывает определенные сложности при изучении закрепления аллелотоксинов в почвах, но и создает возможность снижения активности аллелотоксинов и ингибирующей способности почв путем их закрепления в гумусовой матрице.

Кардинально изменить источники поступления в почву и удаления аллелотоксинов из нее достаточно сложно, но можно воздействовать на прочность их связи с гумусовой матрицей почвенных гелей, активируя структурный переход в этой матрице, увеличивая тем самым энергию связи аллелотоксинов с гумусовой матрицей и снижая их действующую концентрацию в почвах. Подобный путь может оказаться достаточно эффективным, поскольку он основан на использовании ресурсов самих почв для закрепления аллелотоксинов.

## Выводы

1. Аллелотоксичность почв — распространенное явление и обуславливает существенные потери урожая сельскохозяйственных культур. Использование севооборотов для борьбы с этим негативным явлением не всегда приемлемо и недостаточно эффективно.

2. Требуется разработка новых методов, позволяющих быстро снижать аллелотоксичность почв, в основе которых может лежать снижение концентрации аллелотоксинов в почвах путем активации развития микроорганизмов, способных использовать аллелотоксины в качестве источников углерода, или закрепление аллелотоксинов (снижение их активности) в гумусовой матрице почвенных гелей.

## Список литературы

- [1] 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.
- [2] Красильников Н.А. Микроорганизмы почвы и высшие растения. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 464 с.
- [3] McCalla T.M., Haskins F.A. Phytotoxic Substances from Soil Microorganisms and Crop Residues // *Bacteriological Reviews*, 1964, v.28, no.2, pp. 181–207.
- [4] Коношина С.Н. Влияние различных способов использования почвы на ее аллелопатическую активность. Дис. ... канд. с.-х. наук. Орел, 2000. 145 с.
- [5] Лобков В.Т. Использование почвенно-биологического фактора в земледелии. Орел: Орловский ГАУ, 2017. 166 с.
- [6] Лобков В.Т. Почвоутомление при выращивании полевых культур. М.: Колос, 1994. 112 с.
- [7] Blum U. Allelopathy: A Soil System Perspective // *Allelopathy. A Physiological Process with Ecological Implications*. Eds. M.J. Reigosa, N. Pedrol, L. Gonzalez. Netherlands: Springer, 2006, pp. 299–340.
- [8] Vokou D., Chalkos D. and Karamanoli K. Microorganisms and Allelopathy: A One-Sided Approach // *Allelopathy. A Physiological Process with Ecological Implications*. Eds. M.J. Reigosa, N. Pedrol, L. Gonzalez. Netherlands: Springer, 2006, pp. 341–371.
- [9] Млечко Е.А., Мотренко А.В. Аллелопатическое действие водного экстракта шалфея эфиопского (*Salvia Aethiopsis* L.) на прорастание семян тест-растений // *Вестник ВолГУ*, 2015. Сер. 9. Вып. 13. С. 10–14.
- [10] Симагина Н.О. Аллелопатический потенциал древесных растений // *Уч. зап. Таврич. нац. ун-та им. В.И. Вернадского*. Сер. Биология, химия, 2013. Т. 26(65). № 1. С. 186–193.
- [11] Reigosa M.J., Pedrol N., Gonzalez L. Allelopathy. A Physiological Process with Ecological Implications. Netherlands: Springer, 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, 58 (3), pp. 351–357.
- [14] Зинченко М.К., Селицкая О.В. Биологическая токсичность серой лесной почвы в зависимости от систем удобрений // *Агрохимический вестник*, 2011. № 5. С. 38–40.
- [15] Мирчинк Т.Г. Почвенная микология. М.: МГУ, 1988. 220 с.
- [16] Шутко А.П. Биологическое обоснование оптимизации системы защиты озимой пшеницы от болезней в Ставропольском крае. Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. СПб.; Пушкин, 2013. 41 с.
- [17] Рудаков В.О., Рудаков О.Л. Природа почвенных фитоксикозов и проблема защиты растений // *Агро XXI*, 2009. № 1–3. С. 11–13.
- [18] Rice E.L. Allelopathy. New York, London: Academic Press, 1984. 422 p.
- [19] ГОСТ Р ИСО 22030–2009. Качество почвы. Биологические методы. Хроническая фитотоксичность в отношении высших растений. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200077669> (дата обращения 18.02.2019).
- [20] Федотов Г.Н., Шалаев В.С., Батырев Ю.П., Горепекин И.В. Методика для оценки эффективности действия стимуляторов прорастания семян // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2018. № 5. С. 3–10.
- [21] Кустова О.К. Аллелопатическое влияние послеуборочных остатков *OSIMUM BASILICUM* L // *Промышленная ботаника*, 2007. Вып. 7. С. 204–207.
- [22] Передериева В.М., Власова О.И., Шутко А.П. Аллелопатические свойства сорных растений и их растительных остатков в процессе минерализации // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*, 2011. № 73. URL: <http://ej.kubagro.ru/2011/09/pdf/11.pdf> (дата обращения 18.02.2019).
- [23] Черняк Д.М. Аллелопатические свойства почв многолетних интродукционных насаждений *Heracleum Sosnowskyi* И *Heracleum Moellendorffii* // *Современные проблемы науки и образования*, 2017. № 5. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=26901> (дата обращения 18.02.2019).
- [24] Abbas T., Zahir Z.A., Naveed M. Bioherbicidal activity of allelopathic bacteria against weeds associated with wheat and their effects on growth of wheat under axenic conditions // *International Organization for Biological Control (IOBC)*, 2017. DOI: 10.1007/s10526-017-9836-6
- [25] Jabran K., Mahajan G., Sardana V., B.S. Chauhan B.S. Allelopathy for weed control in agricultural systems // *Crop Protection*, 2015, v. 72, p. 57–65.
- [26] Annemieke van der Meulen A review of weed management in wheat using crop competition // *Crop Protection*, 2016, p. 1–7.
- [27] Farooq M., Bajwa A.A., Cheema S.A., Cheema Z.A. Application of allelopathy in crop production // *Int. J. Agric. Biol.*, 2013, v. 15, pp. 1367–1378.
- [28] Li Y.P., Feng Y.L., Chen Y.J., Tian Y.H. Soil microbes alleviate allelopathy of invasive plants // *Sci. Bull.*, 2015, v. 60(12), pp. 1083–1091.
- [29] Norouzi Y., Mohammadi G.R. and Nosratti I. Soil factors affecting the allelopathic activities of some plant species // *J. Appl. Environ. Biol. Sci.*, 2015, 5(8), pp. 285–290.
- [30] Федотов Г.Н., Добровольский Г.В. Возможные пути формирования нано- и микроструктур в гумусовых веществах почвенных гелей // *Почвоведение*, 2012. № 8. С. 908–920.
- [31] Федотов Г.Н., Шоба С.А., Поздняков А.И., Пузанова А.Е. Структурный переход в гумусовой матрице почвенных гелей и его влияние на свойства почв // *Почвоведение*, 2014. № 9. С. 1056–1067.
- [32] Стаценко А.П., Гришин Г.Е., Чернышов В.Е. Способ оценки почвоутомления. Патент РФ 2181238, 2002. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2181238> (дата обращения 18.02.2019).

## Сведения об авторах

**Федотов Геннадий Николаевич** — вед. науч. сотр., д-р биол. наук, Факультет почвоведения, МГУ имени М.В. Ломоносова, gennadiy.fedotov@gmail.com

**Шалаев Валентин Сергеевич** — гл. науч. сотр., д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), shalaev@mgul.ac.ru

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

Поступила в редакцию 22.05.2019.

Принята к публикации 20.09.2019.

## ALLELOTOXICITY OF SOILS, MECHANISMS OF ITS OCCURRENCE AND POSSIBLE WAYS OF REDUCTION

G.N. Fedotov<sup>1,2</sup>, V.S. Shalaev<sup>2</sup>, Yu.P. Batyrev<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

gennadiy.fedotov@gmail.com

The phenomenon alleloxicity of soils and its negative impact on plant development is considered. It is shown that the study of the soils chemical composition does not allow to determine unambiguously the presence of alleloxicity in soils and its value. Therefore, it is necessary to use biotesting methods to study alleloxicity of soils. It is established that the use of crop rotations only to combat soil alleloxicity does not completely solve the problem of soil fatigue. It is concluded that to reduce a soils alleloxicity is necessary to develop methods, which can be reduced concentration of allelotoxins in the soil by activating growth of microorganisms capable to use allelotoxins as sources of carbon or consolidation of allelotoxins (reduction of activity) in the humic matrix of soil gels.

**Keywords:** alleloxicity of soils, soil inhibition seed sprout growth, reducing toxicity, microorganisms, humic matrix of soil gels and fixing it allelotoxins

**Suggested citation:** Fedotov G.N., Shalaev V.S., Batyrev Yu.P. *Allelotoksichnost' pochv, mekhanizmy ee vozniknoveniya i vozmozhnye puti snizheniya* [Alleloxicity of soils, mechanisms of its occurrence and possible ways of reduction]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 2, pp. 37–42. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-37-42

## References

- [1] Grodzinskiy A.M., Bogdan G.P., Golovko E.A., Dzyubenko N.N., Moroz P.A., Prutenskaya N.I. *Al-lelopaticheskoe pochvoutomlenie* [Allelopathic soil fatigue]. Kiev: Naukova dumka, 1979, 248 p.
- [2] Krasil'nikov N.A. *Mikroorganizmy pochvy i vysshie rasteniya* [Soil microorganisms and higher plants]. Moscow: AN SSSR, 1958, 464 p.
- [3] McCalla T.M., Haskins F.A. Phytotoxic Substances from Soil Microorganisms and Crop Residue. *Bacteriological Reviews*, 1964, v. 28, no. 2, pp. 181–207.
- [4] Konoshina S.N. *Vliyanie razlichnykh sposobov ispol'zovaniya pochvy na ee allelopaticheskuyu aktivnost'* [Influence of different methods soil use on its allelopathic activity]. Dis. ... kand. s.-kh. nauk. Orel, 2000, 145 p.
- [5] Lobkov V.T. *Ispol'zovanie pochvenno-biologicheskogo faktora v zemledelii: monografiya* [The use of soil and biological factors in agriculture]. Orel: OGAU, 2017, 166 p.
- [6] Lobkov V.T. *Pochvoutomlenie pri vyrashchivanii polevykh kul'tur* [Soil fatigue in cultivation of field crops]. Moscow: Kolos, 1994, 112 p.
- [7] Blum U. Allelopathy: A Soil System Perspective. *Allelopathy. A Physiological Process with Ecological Implications*. Eds. M.J. Reigosa, N. Pedrol, L. Gonzalez. Netherlands: Springer, 2006, pp. 299–340.
- [8] Vokou D., Chalkos D. and Karamanoli K. Microorganisms and Allelopathy: A One-Sided Approach. *Allelopathy. A Physiological Process with Ecological Implications*. Eds. M.J. Reigosa, N. Pedrol, L. Gonzalez. Netherlands: Springer, 2006, pp. 341–371.
- [9] Mlechko E.A., Motrenko A.V. *Allelopaticheskoe deystvie vodnogo ekstrakta shalfeya efjopskogo (Salvia Aethiopsis L.) na prorastanie semyan test-rasteniy* [Allelopathic effect of aqueous extract of Ethiopian sage (Salvia Aethiopsis L.) on seeds germination of test plants]. *Vestnik VolGU*, 2015, ser. 9, v. 13, pp. 10–14.
- [10] Simagina N.O. *Allelopaticheskii potentsial drevesnykh rasteniy* [Allelopathic potential of woody plants]. *Uchenye zapiski Tavricheskogo natsional'nogo universiteta im. V.I. Vernadskogo. Ser. Biologiya, khimiya* [Scientific notes of Taurida National University. IN AND. Vernadsky. Ser. Biology, Chemistry], 2013, t. 26(65), no. 1, pp. 186–193.
- [11] Reigosa M.J., Pedrol N., Gonzalez L. *Allelopathy. A Physiological Process with Ecological Implications*. Netherlands: Springer, 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, 58 (3), pp. 351–357.
- [14] Zinchenko M.K., Selitskaya O.V. *Biologicheskaya toksichnost' seroy lesnoy pochvy v zavisimosti ot sistem udobreniy* [The biological toxicity of grey forest soil depending on the fertilizers system]. *Agrokhimicheskii vestnik* [Agrochemical Herald], 2011, no. 5, pp. 38–40.
- [15] Mirchink T.G. *Pochvennaya mikologiya* [Soil Mycology]. Moscow: MSU, 1988, 220 p.
- [16] Shutko A.P. *Biologicheskoe obosnovanie optimizatsii sistemy zashchity ozimoy pshenitsy ot bolezney v Stavropol'skom krae* [Biological basis of protection system optimization of winter wheat against diseases in the Stavropol region]. Dis. ... Dr. Sci. (Agric.). SPb., Pushkin, 2013, 41 p.
- [17] Rudakov V.O., Rudakov O.L. *Priroda pochvennykh fitosikozov i problema zashchity rasteniy* [The nature of the soil phytotoxicity and the problem of plant protection]. *Agro XXI*, 2009, no. 1–3, pp. 11–13.
- [18] Rice E.L. *Allelopathy*. New York, London: Academic Press, 1984, 422 p.
- [19] GOST R ISO 22030–2009. *Kachestvo pochvy. Biologicheskie metody. Khronicheskaya fitotoksichnost' v otnoshenii vysshikh rasteniy*. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200077669> (accessed 18.02.2019).
- [20] Fedotov G.N., Shalaev V.S., Batyrev Yu.P., Gorepekin I.V. *Metodika dlya otsenki effektivnosti deystviya stimulyatorov prorstaniya semyan* [Methods for evaluating the effectiveness of seed germination stimulants]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2018, no. 5, pp. 3–10.
- [21] Kustova O.K. *Allelopaticheskoe vliyaniye posleuborochnykh ostatkov Ocimum Basilicum L* [Allelopathic effect of post-harvest residues of *Ocimum Basilicum L*]. *Promyshlennaya botanika* [Industrial Botany], 2007, v. 7, pp. 204–207.
- [22] Perederieva V. M., Vlasova O. I., Shutko A. P. 2011. *Allelopaticheskie svoystva sornykh rasteniy i ikh rastitel'nykh ostatkov v protsesse mineralizatsii* [Allelopathy properties of weeds and plant residues in the process of mineralization]. *Polimatemicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Scientific Journal of KubSAU], no. 73. Available at: <http://ej.kubagro.ru/2011/09/pdf/11.pdf> (accessed 18.02.2019).
- [23] Chernyak D.M. *Allelopaticheskie svoystva pochv mnogoletnikh introduktsionnykh nasazhdeniy Heracleum Sosnowskyi i Heracleum Moellendorffii* [Allelopathic properties of soils long-term introduction plantings]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2017, no. 5. Available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=26901>. (accessed 18.02.2019).
- [24] Abbas T., Zahir Z.A., Naveed M. Bioherbicidal activity of allelopathic bacteria against weeds associated with wheat and their effects on growth of wheat under axenic conditions. *International Organization for Biological Control (IOBC)*, 2017. DOI: 10.1007/s10526-017-9836-6 (accessed).
- [25] Jabran K., Mahajan G., Sardana V., B.S. Chauhan B.S. Allelopathy for weed control in agricultural systems. *Crop Protection*, 2015, v. 72, p. 57–65.
- [26] Annemieke van der Meulen A review of weed management in wheat using crop competition. *Crop Protection*, 2016, p. 1–7.
- [27] Farooq M., Bajwa A.A., Cheema S.A., Cheema Z.A. Application of allelopathy in crop production. *Int. J. Agric. Biol.*, 2013, v. 15, pp. 1367–1378.
- [28] Li Y.P., Feng Y.L., Chen Y.J., Tian Y.H. Soil microbes alleviate allelopathy of invasive plants. *Sci. Bull.*, 2015, v. 60(12), pp. 1083–1091.
- [29] Norouzi Y., Mohammadi G.R. and Nosratti I. Soil factors affecting the allelopathic activities of some plant species. *J. Appl. Environ. Biol. Sci.*, 2015, 5(8), pp. 285–290.
- [30] Fedotov G.N., Dobrovol'skiy G.V. *Vozmozhnye puti formirovaniya nano- i mikrostruktur v gumu-sovykh veshchestvakh pochvennykh geley* [Possible ways formation of nano- and microstructures in humus substances of soil gels]. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 2012, no. 8, pp. 908–920.
- [31] Fedotov G.N., Shoba S.A., Pozdnyakov A.I., Puzanova A.E. *Strukturnyy perekhod v gumusovoy matritse pochvennykh geley i ego vliyaniye na svoystva pochv*. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 2014, no. 9, pp. 1056–1067.
- [32] Statsenko A.P., Grishin G.E., Chernyshov V.E. *Sposob otsenki pochvoutomleniya* [Estimation method of soil fatigue]. Patent RU 2181238, 2002. Available at: <http://www.freepatent.ru/patents/2181238> (accessed 18.02.2019).

## Authors' information

**Fedotov Gennadiy Nikolaevich** — Senior Researcher, Dr. Sci. (Biology), Lomonosov Moscow State University, [gennadiy.fedotov@gmail.com](mailto:gennadiy.fedotov@gmail.com)

**Shalaev Valentin Sergeevich** — Dr. Sci. (Tech.) Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), [shalaev@mgul.ac.ru](mailto:shalaev@mgul.ac.ru)

**Batyrev Yuriy Pavlovich** — Cand. Sci. (Tech.) Associated Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), [batyrev@mgul.ac.ru](mailto:batyrev@mgul.ac.ru)

Received 22.05.2019.

Accepted for publication 20.09.2019

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРОЕНИЕ ДРЕВЕСИНЫ ГЕВЕИ БРАЗИЛЬСКОЙ (*HEVEA BRASILIENSIS* MÜLL. ARG.)

Золтан Борчок<sup>1</sup>, Шриваро Сутон<sup>2</sup>, Золтан Пастори<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Инновационный центр, Шопронский университет, г. Шопрон, ул. Байчи-Жилински, 4, Венгрия, 9400

<sup>2</sup>Материаловедение и инженерная программа, Школа инженерии и ресурсов, Университет Валайлак, район Тасала, Накхон Си Таммарат, Таиланд, 80160

borcsok.zoltan@uni-sopron.hu

Представлены результаты исследования влияния температуры и продолжительности термической обработки (при 180 и 220 °С в течение 15, 25 и 35 ч) на строение древесины гевеи бразильской (*Hevea brasiliensis* Müll. Arg.). Использован метод сканирующей электронной микроскопии для получения электронных микрофотографий в целях измерения толщины двойной клеточной стенки и размера люмена. Рассчитаны соотношения люмен/стенка для волокон и паренхимных клеток в радиальном и тангенциальном направлениях. Результаты работы показали, что термообработка при 180 °С не влияла или оказывала незначительное влияние на строение древесины гевеи бразильской в течение любой продолжительности обработки. Термическая обработка при 220 °С в большей мере повлияла на структуру растения: уменьшилась толщина двойной клеточной стенки, но диаметр люмена не изменился, поэтому значение отношения люмен/клеточная стенка увеличилось. Сделан вывод о том, что длительность термообработки оказывает лишь незначительное влияние на изменения в строении древесины гевеи бразильской.

**Ключевые слова:** термическая обработка, анатомия древесины, сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), волокно, паренхима, двойная клеточная стенка, люмен клетки, соотношение люмен/стенка

**Ссылка для цитирования:** Борчок З., Сутон Ш., Пастори З. Влияние термической обработки на строение древесины гевеи бразильской (*Hevea brasiliensis* Müll. Arg.) // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 2. С. 43–50. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-43-50

### Сведения об авторах

**Борчок Золтан** — исследователь Инновационного центра, Шопронский университет, г. Шопрон, Венгрия, borcsok.zoltan@uni-sopron.hu

**Сутон Шриваро** — исследователь Школы инженерии и ресурсов, Университет Валайлак, Таиланд, ssuthon@wu.ac.th

**Пастори Золтан** — директор Инновационного центра, Шопронский университет, г. Шопрон, Венгрия, pasztory.zoltan@uni-sopron.hu

Поступила в редакцию 03.10.2019.

Принята к публикации 16.01.2020.

## EFFECT OF HEAT TREATMENT ON SOME CELLULAR PROPERTIES OF RUBBERWOOD (*HEVEA BRASILIENSIS* MÜLL. ARG.)

Zoltán Börcsök<sup>1</sup>, Srivaro Suthon<sup>2</sup>, Zoltán Pásztor<sup>1</sup>

<sup>1</sup>University of Sopron, Innovation Center 4, Bajcsy Zs. Sopron H-9400, Hungary

<sup>2</sup>Materials Science and Engineering Program, School of Engineering and Resources, Walailak University, Thasala district, Nakhon Si Thammarat 80160, Thailand

borcso.zoltan@uni-sopron.hu

The effect of different treatment temperatures and different treatment durations on the certain anatomical properties of the rubberwood (*Hevea brasiliensis* Müll. Arg.) was examined. Rubberwood samples were treated at 180 ° and 220 °C for 15, 25 and 35 hours. SEM pictures were taken to measure double cell walls, cell lumens; and the lumen/wall ratio was calculated for fiber and parenchyma cells, in radial and tangential directions. Treatment at 180 °C had no or only a slight effect on the anatomy of rubberwood for any treatment duration. The treatment at 220 °C has an effect on the anatomy of rubberwood: the double cell wall size decreased, the lumen diameter did not change, so the lumen/cell wall ratio increased. The treatment duration has only a slight effect on the changes.

**Keywords:** heat treatment, wood anatomy, SEM, fiber, parenchyma, double cell wall, cell lumen, lumen/wall ratio

**Suggested citation:** Börcsök Z., Suthon S., Zoltán Pásztor Z. *Vliyanie termicheskoy obrabotki na stroenie drevesiny gevei brazil'skoy (Hevea brasiliensis Müll. Arg.)* Effect of heat treatment on some cellular properties of rubberwood (*Hevea brasiliensis* Müll. Arg.). *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 2, pp. 43–50.

DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-43-50

Numerous studies deal with the anatomy of different tree species in many respects, for example: [1, 2]. Some studies focused on the dimensions of wood cells and their changes in heat treatment. Hietala *et al.* [3] used liquid state NMR for measurements and did not find significant differences in the pore size of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) before and after heat treatment at 180 °C and 230 °C for 4 h. Ahmed *et al.* [4] studied the preservative uptake of thermally modified aspen (*Populus tremula* L.) and birch (*Betula pendula* Roth.). Gunduz *et al.* [5] used an environmental scanning electron microscope (ESEM) to compare the anatomy of the healthy and infected (Chestnut Blight Diseased) chestnut tree (*Castanea sativa* Mill.) and described several changes in the anatomy of the cambium and the wood.

Kocaefe *et al.* [6] examined jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.) samples by several methods, including scanning electron microscopy (SEM). They found only slight effects: micro-cracks were formed on cell walls during the heat treatment at 210 °C. Anderson *et al.* [7] found similar results: thermal modification did not change the anatomy of the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) at the micrometer level, but they found that the surface of the pores increased because of the cracks in the cell wall observed. Heat treatment of red cedar (*Thuja plicata* Donn ex D. Don) at 200 °C for 1 and 2 h destroyed tracheid cell walls, caused despiration of the pits, which resulted more openings in the wood [8]. Similar changes were found in aspen and birch wood by Ahmed *et al.* [4]. Batista *et al.* [9] investigated the anatomical changes of *Eucalyptus grandis* W. No significant changes in fibers, vessels and parenchyma cell were noted. Bakar *et al.* [10] treated red oak (*Quercus rubra* L.), Eastern red cedar (*Juniperus virginiana* L.) and rubberwood

(*Hevea brasiliensis* Müll. Arg.) at 120 °C and 190 °C for 2 and 8 h and used SEM to investigate the anatomical changes. They found that most of the cells in all heat treated samples had some deformation, such as collapse. They thought that high temperature softened the components of the cell wall, causing closing of the cell lumens and loss of wood strength. Boonstra [11] and Boonstra *et al.* [12, 13] examined the effects of heat treatment on soft and hardwood species. Radial and tangential cracks were observed in different amounts. Cracks near the rays were often observed and collapse and deformation of vessels and libriform fibers was found in hardwoods. Ling *et al.* [14] treated *Populus cathayana* Rehder at 180 °C, 200 °C and 220 °C for 4 h. The anatomical structure of the wood was examined, and an increase in the number of the distorted and cracked cell walls was observed. The average wall thickness to lumen diameter ratios of the fibers was also calculated and it was found that fiber walls thickened, while the lumen of the fibers shrank. Biziks *et al.* [15] measured the total area, wall area, lumen area, wall thickness and lumen linear size of fibers and vessels of birch (*Betula pendula* Roth.), before and after heat treatment (140 °C, 160 °C and 180 °C, 1 h). With the increasing treatment temperature, the fiber cross-section sizes decreased significantly. Parallel to this, cracks appeared in the middle lamella and the shape of the fibers became more round. The effect of the treatment parameters on the vessel walls was relatively small. The rays also became more visible after the treatments. Bernabei and Salvatici [16] made real time observations with ESEM, during heat treatment of spruce wood (*Picea abies* Karst.). Up to 100 °C the swelling of the cell wall thickness was observed. Subsequently

up to 200 °C no changes were observed, but over 200 °C a great reduction of the cell wall thickness was seen. At the end of the observations, the cell lumen decreased by 10 % too.

Most of the studies used a shorter treatment duration. Based on the above, it appears that short-term, lower-temperature treatments have barely detectable results, while the effects of longer or higher temperatures (above 180 °C) changes can be detected.

The aim of this research was to examine the effect of different treatment temperatures 180 °C and 220 °C and different treatment durations 15, 25 and 35 hours on the certain cellular properties of rubberwood (*Hevea brasiliensis* Müll.Arg.).

## Materials and methods

Rubberwood samples derived from the region of Nakhon Si Thammarat province in Thailand. The samples were cut from the same board with the dimensions of 10×10×10 mm (Fig. 1). The samples were prepared before the treatment, later no other changes were made.

According to the heating schedule, the rubberwood samples were heated from room temperature to 90 °C in five hours, from 90 °C to 130 °C in another 5 hours, and the top (180 °C and 220 °C) temperature was achieved two in hours. Three different treatment durations (on constant 180 °C and 220 °C) were used which last 15, 25 and 35 hours. For the soft cooling, the thermal inertia of the chamber was used and the whole system cooled down to room temperature after about 15 hours. For the treatment a custom-made laboratory chamber was used. The system is an open (not air tight) and dry system. As the system is open, the water content of the small samples is completely removed during the heat treatment. This affected all samples equally, since this stage of treatment was the same in all cases. After heat treatment, the samples were placed in a climate chamber (20 °C, 65 %), which was followed by SEM examination. Because of the conditions inside the electron microscope, the samples again lost most of their water content. This water loss does not cause any further cracks. Consequently, the differences were caused by peak temperature treatments.

The samples were examined with a Hitachi-3400N scanning electron microscope, 10 kV acceleration potential was used and the working distance was around 10 mms. The samples were coated with gold-palladium. The cross-section of the rubberwood was taken for the measurement at 100–1,000 magnification. The measurements were done with Image-Pro Plus 7.0 software (Media Cybernetics Inc.).

The following properties were measured and calculated (see Fig. 2):

- fiber double cell wall thickness (FW) [ $\mu\text{m}$ ];
- fiber lumen diameter (FL) [ $\mu\text{m}$ ];

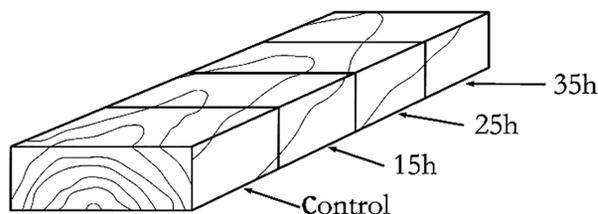


Fig. 1. Sampling method: The specimens came from the same board and followed each other in the longitudinal direction

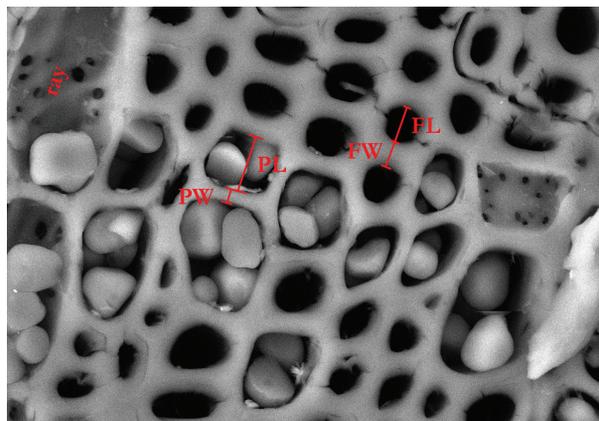


Fig. 2. Measured cell properties in radial direction. Cell wall thickness (PW) and lumen diameter (PL) of parenchyma and of fiber (FW and FL respectively) were measured

- fiber lumen/double cell wall ratio (FLW) [dimensionless];
- parenchyma double cell wall thickness (PW) [ $\mu\text{m}$ ];
- parenchyma lumen diameter (PL) [ $\mu\text{m}$ ];
- parenchyma lumen/double cell wall ratio (PLW) [dimensionless].

At least 100 measurements were made from each type. The parameters of the cells were separately measured in radial and tangential directions.

In addition to the above, pictures were taken of cracks and changes in cell walls. Longitudinal images were also made for this purpose.

## Results and discussion

It is noteworthy that in many cases, the cell wall thickness of parenchyma cells is less in the tangential direction than radial. The reason for this is that the parenchyma cells are arranged in tangential lines and bands besides the rays. Thus, in many cases in a tangential direction, a thin-walled parenchyma is also a neighbour of a parenchyma cell, while radially most often there is a thick-walled fiber.

In many cases, the latewood fibers are flattened radially, so the average size of the lumens of the fiber cells higher in the tangential than in the radial direction.

Fig. 3 and Table shows the changes of cell wall thicknesses and lumen diameters of the fibers and parenchyma cells of heat treated rubberwood compared to control samples.

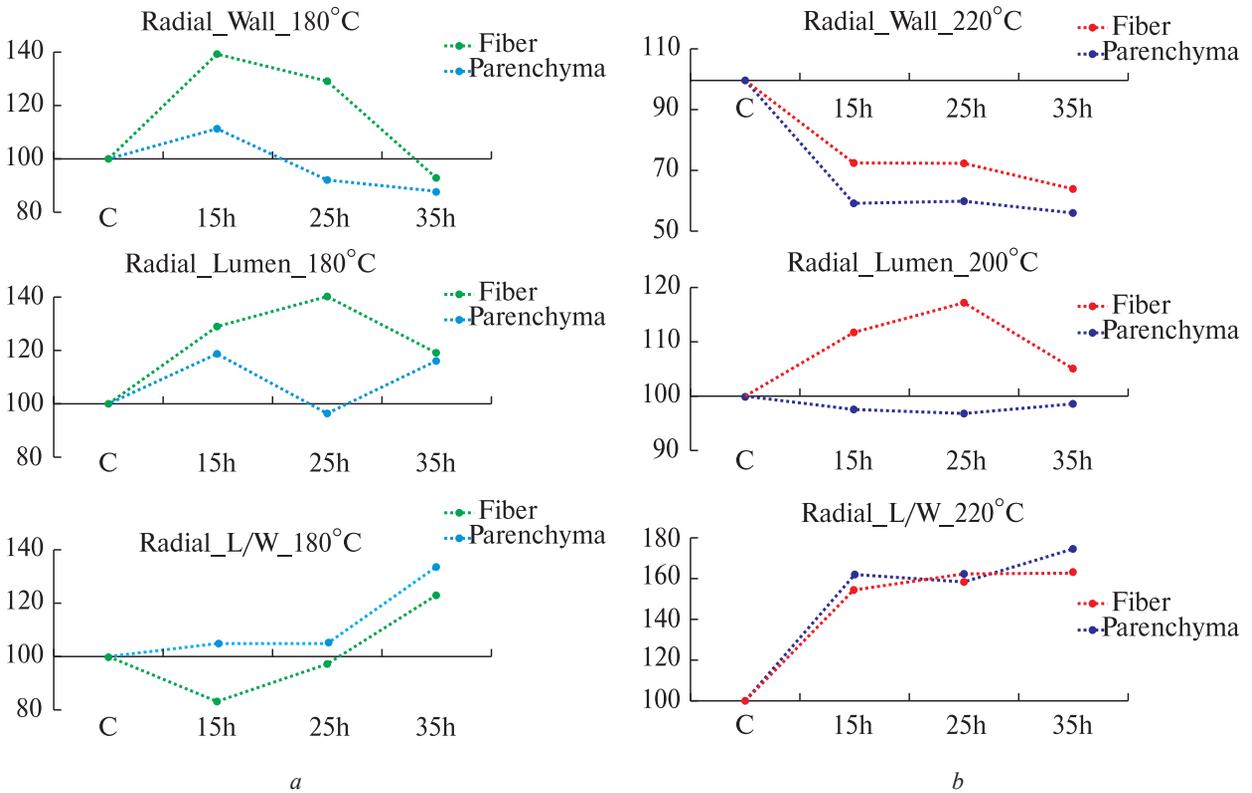


Fig. 3. Changes of average cell wall thickness, lumen diameter and lumen/wall ratio for fibers and parenchyma of rubberwood, at 180 °C (a) and 220 °C (b) treatment for 15, 25 and 35 hours, and for radial direction (C = control) on the base of control (100 %)

**Changes (%) of average cell wall thickness, lumen diameter and lumen/wall ratio of fibers and parenchyma cells of rubberwood, at 180 °C and 220 °C treatment for 15, 25 and 35 hours (C = control) on the base of control (100 %)**

Temperature, °C	Cell type*	Radial											
		Double cell wall				Cell lumen				Lumen/Wall ratio			
		C [µm]	15 h [%]	25 h [%]	35 h [%]	C [µm]	15 h [%]	25 h [%]	35 h [%]	C [µm]	15 h [%]	25 h [%]	35 h [%]
180	F	6,4 (100%)	110,9	92,2	88,6	9,9 (100%)	117,8	96,8	115,4	1,6 (100%)	104,7	104,6	131,9
180	P	2,8 (100%)	138,4	128,2	92,7	17,2 (100%)	127,4	138,1	117,9	7,3 (100%)	84,3	97,4	121,9
220	F	8,1 (100%)	72,2	72,6	64,0	9,4 (100%)	111,5	117,0	105,1	1,3 (100%)	153,4	160,6	161,0
220	P	3,9 (100%)	59,6	59,9	56,4	21,5 (100%)	97,8	96,8	98,6	6,4 (100%)	160,6	156,7	173,0
Tangential													
180	F	6,8 (100%)	90,5	91,7	92,4	11,6 (100%)	103,5	97,8	135,6	1,8 (100%)	110,3	103,9	145,4
180	P	2,4 (100%)	120,5	126,2	109,5	13,9 (100%)	135,5	123,1	145,2	6,3 (100%)	112,4	96,1	139,8
220	F	6,2 (100%)	84,7	83,6	71,7	13,2 (100%)	94,0	99,0	82,8	2,2 (100%)	112,6	122,9	119,2
220	P	2,9 (100%)	59,6	67,2	57,0	19,2 (100%)	93,0	88,1	84,7	7,2 (100%)	153,1	129,2	148,2

\*Cell type: F — fiber; P — parenchyma.

## Treatment at 180 °C

No significant difference was observed in the fibers or parenchyma cells compared to control samples. In the 15-hour treatment, there is a slight increase in the cross-section of the cell walls as in the parenchyma and in the fiber cells, which disappears during longer treatments. Changes are similar in the cell lumen as well. However, the rate of decrease is less at 35 hours of treatment, so the average size of the cell cavities is greater than the baseline (control) value. This slightly larger average size can be explained by the larger amounts of earlywood in these samples. As a result, the cell lumen / cell wall ratio hardly changes during the 15 and 25 hour treatments, while the 35 hour treatment shows a marked increase.

In contrast, Ling *et al.* [14] was able to detect changes in the cell lumen/cell wall ratio at 180 °C for 4 hours in poplar. Some authors observed in short-term 180 °C or lower temperature hydrothermal treatment, the decrease of the cell wall area and the increase of the lumen area and linear size [15]. On the other hand, Bernabei and Salvatici [16] found that at approximately between 100 °C and 200 °C, the cell wall dimensions remained almost constant; only a slight decrease could be detected. Due to the time-elongation of the process and the increase in temperature, the degradation of hemicelluloses was observed during hydrothermal treatment.

The treatments in our study were much longer and the treatment occurred in the presence of oxygen but with the exclusion of steam, which may have led to the disappearance of the initial cell wall swelling as the treatment progressed.

## Treatment at 220 °C

In the radial direction, the cell wall of the parenchyma cells the median and the average of control group is the largest, and for all treatments the median and average values are lower. In contrast, cell lumens do not differ in size from the control group, but for fibers a slight increase can be observed, but this could be from the fluctuation of the measurement. Hence the ratio of lumen to cell wall is higher for treated samples. The same can be said for the tangential direction and for fiber cells in both directions (Table). As a result of the 220 °C heat treatment, all the treatment times had an effect on the anatomical structure: the average cell wall thickness decreased, the size of the cell lumen remained unchanged, while the lumen/cell wall ratio increased. However, there was no detectable difference between treatment durations; only minor fluctuations were detected due to different rates of earlywood and latewood.

The reduction of cell wall thickness was observed above 180 °C (even more above 200 °C) in other studies too [15–17], which is mostly explained by the

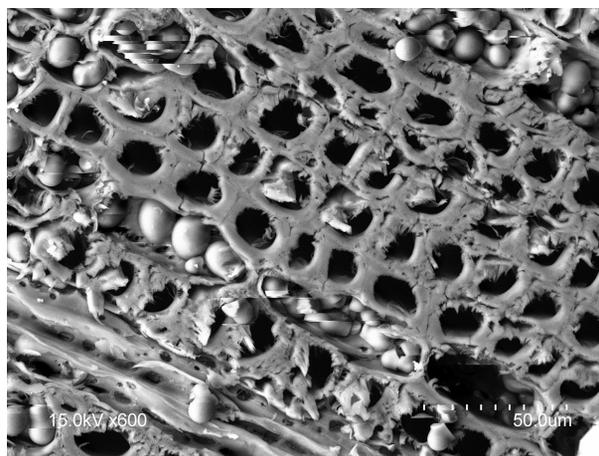


Fig. 4. Separation of adjacent cells of rubberwood treated at 180 °C, for 15h

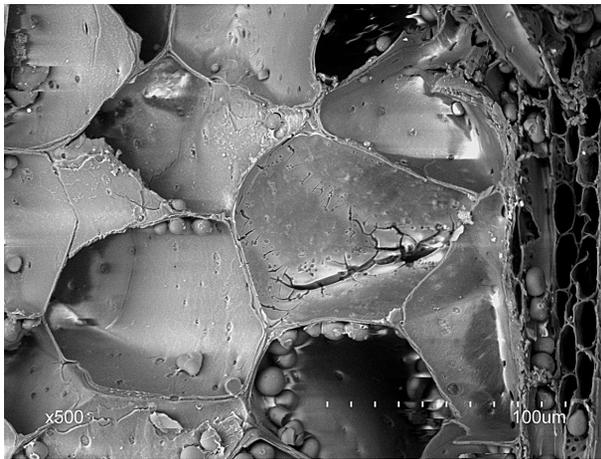
decomposition of hemicelluloses. The decomposition of hemicelluloses in an inert atmosphere begins at about 200 °C [18–20], and under this temperature, mainly hydrolysis can be detected in the presence of vapor. The degradation of hemicelluloses occurs in the same temperature range in the presence of oxygen [21]. It can be explained with the onset of the decomposition of hemicelluloses that the treatment at 180 °C had no detectable effect, but decomposition had already begun at 220 °C (above 200 °C), resulting in a reduction in the cross-sectional size of the cell walls. As there was no significant change in the size of the cell lumens, the lumen/cell wall ratio also changed with the decreasing cell wall size.

**Other observations.** Samples exposed to 180 °C heat treatment have already seen a change in the middle lamella. The pattern of the middle lamella becomes more visible on samples treated for 15 hours, while in the longer-term treatments the partial or complete separation of the adjacent cells are seen (Fig. 4) (180 °C; 15 h).

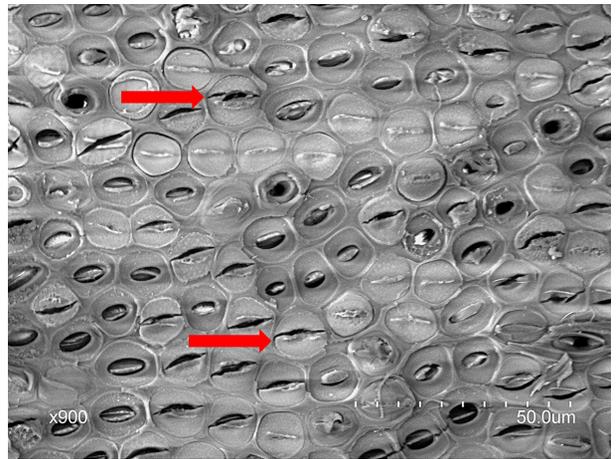
There are more changes in samples treated at 220 °C. A number of cracks were found on the samples when scanning specimens (Fig. 5, a–f). Although no numerical survey was performed, the number of cracks is likely to increase as the duration of the heat treatment increased.

**Vessels.** Changes were found in vessels mainly on intervessel bordered pits (Fig. 5, b): In most cases, the cracks start from the “corner” of the aperture of the pits and often run along the entire length of the pit; (see arrow). In some cases, the direction of the crack does not follow the direction of the aperture. A crack can run around the edge of the pit too; (see arrow). Fissures were also observed on the tyloses, especially where the adjacent cell walls meet (Fig. 5, a).

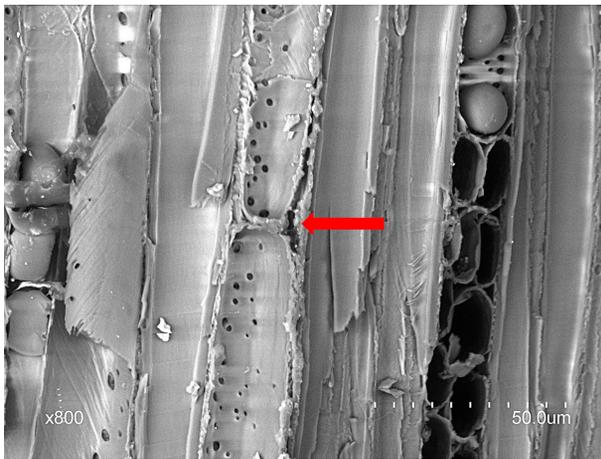
**Axial and ray parenchyma.** Cracks appeared around the axial parenchymal cells too. Parenchyma cells separate from surrounding fibers (Fig. 5, c).



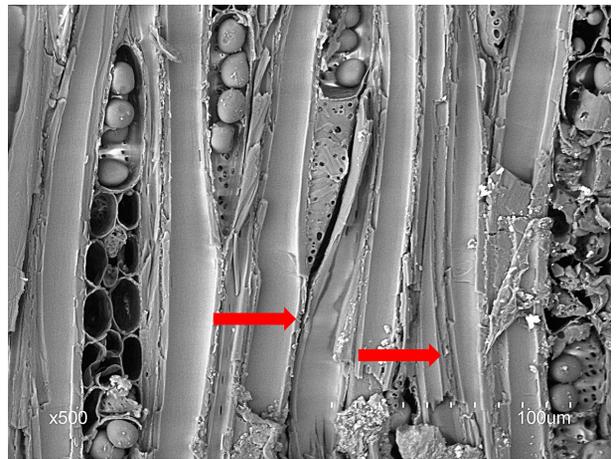
a



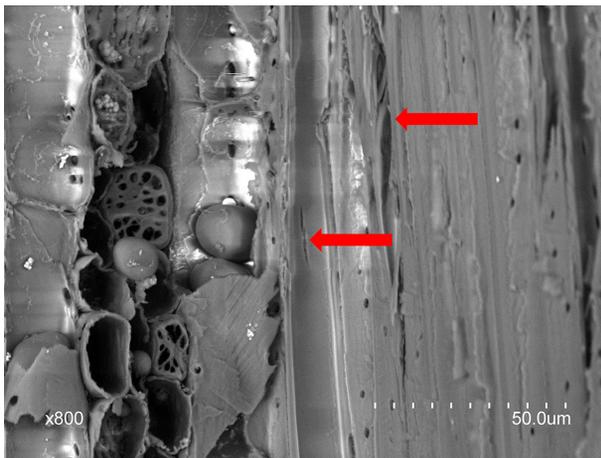
b



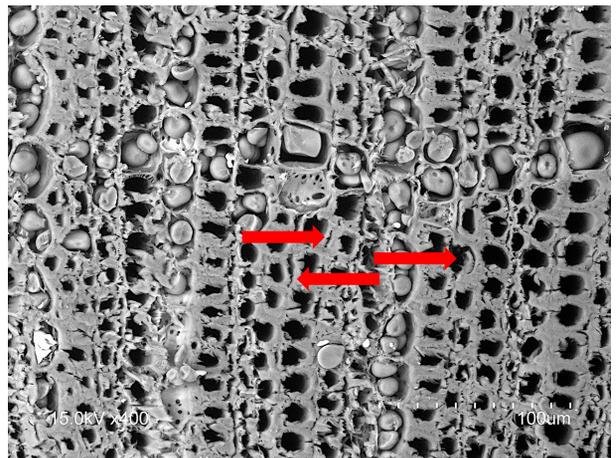
c



d



e



f

Fig. 5. Images of typical degradation during heat treatment of rubberwood (220 °C)

Cracks often developed around the rays, which are conspicuous in cross sections as well and it seems like the ray has opened (Fig. 5, *d*). On the other hand, like Biziks and his colleagues [15], the deformation and opening of the rays were observed. This was mainly found when the cross-section of the marginal cell of the rays was formed. As the rays of the rubberwood are 1–4-seriate and are characterized by larger, upright marginal cells [22], the cracks start mainly from these marginal cells. Gilani *et al.* [17] also found, that the microcracks appear mainly in the multiseriate rays of the beech.

**Fibers.** Smaller cracks can occur in the wall of the fibers. In many cases, the micro-cracks start from the pits. These cracks follow the directions of cellulose fibrils; they are only rarely perpendicular to it (Fig. 5 *e, f*). Sometimes these cracks are linked to each other and create a network. Similar micro-cracks have been found by Kocaefe *et al.* [6] on jack pine, heated to 190–210 °C. Isolated fibers or separated cell wall layers often can be seen (Fig. 5, *f*). The separation of the cells usually occurred at the middle lamella. Similar delaminations were also observed by Kocaefe *et al.* [6], Biziks *et al.* [15] and Ling *et al.* [14].

## Conclusions

Treatment at 180 °C had no or only a slight effect on the anatomy of rubberwood at any treatment durations. The average size of both the cell wall and the cell cavity increased as a result of the treatment, so the lumen/wall ratio did not change. The fluctuations of the measured properties may result from the different ratios of earlywood and latewood.

SEM pictures show that treatment at 180 °C had only a slight effect on rubberwood: changes of the middle lamella were observed, followed by the separation of neighboring cells.

The treatment at 220 °C has an effect on the anatomy of the rubberwood: the double cell wall size decreased, the lumen diameter did not change, so the lumen/cell wall ratio increased.

The treatment duration at 220 °C had no effect on the anatomy of rubberwood. The changes were made during the shortest 15-hour treatment; the longer treatment did not cause any further detectable change.

There are more anatomical changes at 220 °C treatments. SEM images show changes in all cell types, and many new cracks appear in the wood and in the cell walls.

## Acknowledgement

*The work was carried out as part of the "Sustainable Raw Material Management Thematic Network — RING 2017", EFOP-3.6.2-16-2017-00010 project in the framework of the Széchenyi 2020 Program. This project is supported by the European Union, co-financed by the European Social Fund.*

## References

- [1] Naji H.R., Sahri M.H., Nobuchi T., Bakar E.S. Clonal and planting density effects on some properties of rubberwood (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.). *BioResources*, 2012, no. 7(1), pp. 189–202.
- [2] Luostarinen K., Hakkarainen K., Kaksonen H. Wood anatomy of seed and basal bud originated downy birches (*Betula pubescens* Ehrh.) grown at four different sites. *Silva Fennica*, 2017, no. 51(1), article id. 1694. 20 pp. DOI: 10.14214/sf.1694
- [3] Hietala S., Maunu S.L., Sundholm F., Jämsä S., Viitaniemi P. Structure of thermally modified wood studied by liquid state NMR measurements. *Holzforschung*, 2002, no. 56(5), pp. 522–528.
- [4] Ahmed S.A., Sehlstedt-Persson M., Hansson L., Morén T. Evaluation of preservative distribution in thermally modified European aspen and birch boards using computed tomography and scanning electron microscopy. *J. of Wood Science*, 2013, no. 59(1), pp. 57–66. DOI: 10.1007/s10086-012-1299-x
- [5] Gunduz G., Oral M.A., Akyuz M., Aydemir D., Yaman B., Asik N., Bulbul A.S., Allahverdiyev S. Physical, morphological properties and raman spectroscopy of chestnut blight diseased *Castanea sativa* Mill. wood. *CERNE*, 2016, no. 22(1), pp. 43–58. DOI: 10.1590/01047760201622012101
- [6] Kocaefe D., Huang X., Kocaefe Y. Study of the degradation of heat-treated jack pine under different artificial weathering conditions. *International J. of Energy and Environment*, 2013, no. 7(3), pp. 97–106.
- [7] Andersson S., Serimaa R., Väänänen T., Paakkari T., Jämsä S., Viitaniemi P., X-ray scattering studies of thermally modified Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Holzforschung*, 2005, no. 59(4), pp. 422–427.
- [8] Awoyemi L., Jones I.P. Anatomical explanations for the changes in properties of western red cedar (*Thuja plicata*) wood during heat treatment. *Wood Science and Technology*, 2011, no. 45, pp. 261–267. DOI: 10.1007/s00226-010-0315-9
- [9] Batista D.C., Paes J.B., de Muñiz G.I.B., Nisgoski S., Oliveira J.T.S. Microstructural aspects of thermally modified *Eucalyptus grandis* wood. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 2015, no. 17(3), pp. 525–532. DOI: 10.4067/S0718-221X2015005000047
- [10] Bakar B.F.A., Hiziroglu S., Tahir P.M. Properties of some thermally modified wood species. *Materials and Design*, 2013, no. 43, pp. 348–355. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.06.054
- [11] Boonstra M.J. A two-stage thermal modification of wood. Ph.D. dissertation in cosupervision Ghent University and Université Henry Poincaré - Nancy 1, 2008, 297 p. ISBN 978-90-5989-210-1
- [12] Boonstra M.J., Rijdsdijk J.F., Sander C., Kegel B., Tjeerdsmma B., Militz H. Microstructural and physical aspects of heat treated wood, Part 1: Softwoods. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 2006, no. 8(3), pp. 193–208.
- [13] Boonstra M.J., Rijdsdijk J.F., Sander C., Kegel B., Tjeerdsmma B., Militz H. Microstructural and physical aspects of heat treated wood, Part 2: Hardwoods. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 2006, no. 8(3), pp. 209–217.
- [14] Ling Z., Ji Z., Ding D., Cao J., Xu F. Microstructural and topochemical characterization of thermally modified poplar (*Populus cathayana*) cell wall. *BioResources*, 2016, no. 11(1), pp. 786–799.
- [15] Biziks V., Andersons B., Beļkova I., Kapača E., Militz H. Changes in the microstructure of birch wood after hydrothermal treatment. *Wood Science and Technology*, 2013, no. 47, pp. 717–735. DOI 10.1007/s00226-013-0531-1

- [16] Bernabei M., Salvatici M.C. In situ ESEM observations of spruce wood (*Picea abies* Karst.) during heat treatment. *Wood Science and Technology*, 2016, no. 50(4), pp. 715–726. DOI 10.1007/s00226-016-0808-2
- [17] Gilani M.S., Fife J.L., Boone M.N., Wakili K.G. Dynamics of microcrack propagation in hardwood during heat treatment investigated by synchrotronbased X-ray tomographic microscopy. *Wood Science and Technology*, 2013, no. 47, pp. 889–896. DOI 10.1007/s00226-013-0545-8
- [18] LeVan S.L. Thermal degradation. Ed. A.P. Schniewind *Concise encyclopedia of wood and wood-based materials*, Elmsford, NY, Pergamon Press, 1989, pp. 271–273.
- [19] Werner K., Pommer L., Broström M. Thermal decomposition of hemicelluloses. *J. of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2014, no. 110, pp. 130–137. DOI: 10.1016/j.jaap.2014.08.013
- [20] Xing D., Li J. Effect of heat treatment on thermal decomposition and combustion performance of *Larix* spp. wood. *BioResources*, 2014, no. 9(3), pp. 4274–4287.
- [21] Ramiah M.V. Thermogravimetric and differential thermal analysis of cellulose, hemicellulose, and lignin. *J. of Applied Polymer Science*, 1970, no. 14, pp. 1323–1337.
- [22] Zoltán Gy., Bak M., Farkas P. Rubberwood – *Hevea brasiliensis* (In Hungarian). Ed. S. Molnár, P. Farkas, Z. Börcsök, Gy. Zoltán, Földünk ipari fái ('Industrial woods'), 2016, ERFARET, Sopron, Hungary, ISBN 978-963-12-5239-2, pp: 242–244.

## Authors' information

**Börcsök Zoltán** — PhD, Researcher of Innovation Center, University of Sopron, Sopron, Hungary, borcsok.zoltan@uni-sopron.hu

**Suthon Srivaro** — PhD, Researcher of School of Engineering and Resources, Walailak University, Thailand, ssuthon@wu.ac.th

**Pásztory Zoltán** — PhD, Director of Innovation Center, University of Sopron, Sopron, Hungary, pasztory.zoltan@uni-sopron.hu

Received 03.10.2019.

Accepted for publication 16.01.2020.

## СУШКА КРУПНОМЕРНЫХ ПИЛО- И ЛЕСОМАТЕРИАЛОВ

В.П. Галкин<sup>1</sup>, Г.Н. Курышов<sup>1</sup>, А.А. Косарин<sup>2</sup>, С.А. Моисеев<sup>1</sup>, Д.И. Деянов<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>ООО «Форскад», 121359, г. Москва, ул. Партизанская, д. 40

kosarin2008@yandex.ru

Приведен обзор публикаций по сушке крупномерных пило- и лесоматериалов (бруса, оцилиндрованного бревна) в сушильных камерах с использованием энергии электрического поля сверхвысоких частот в среде перегретого пара, гидрофильных жидкостях, вакуума в сочетании с конвективным нагревом древесины. Представлено описание процесса сушки в период с 2014 по 2019 г. в конвективной опытно-промышленной сушильной камере, оснащенной импульсными режимами, в лаборатории кафедры «Древесиноведение и технологии деревообработки» Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сушке подвергались единичные сортименты бруса сечением 100×100, 100×150, 150×150 и 200×200 мм длиной до 2 м, а также оцилиндрованные бревна диаметром 200 и 220 мм длиной 2 м. Кроме этого, с использованием импульсных режимов были высушены образцы окоренных бревен из древесины сосны диаметром от 180 до 280 мм, используемых для изготовления деревянных опор для линий электропередач. В этот же период была проведена сушка импульсным режимом образцов окоренных бревен из древесины липы диаметром от 320 до 350 мм. В процессе всех сушек начальная, текущая, послонная и конечная влажность определялась в соответствии с ГОСТ 16588, изучалось влияние режимных параметров на размеры трещин усушки и т. д. Сделан вывод о возможности использования импульсных режимов в производственных условиях.

**Ключевые слова:** крупномерные пиломатериалы, брус, крупномерные лесоматериалы, оцилиндрованные и окоренные бревна, импульсная сушка, режимы сушки

**Ссылка для цитирования:** Галкин В.П., Курышов Г.Н., Косарин А.А., Моисеев С.А., Деянов Д.И. Сушка крупномерных пило- и лесоматериалов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 2. С. 51–56.

DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-51-56

Научно-исследовательские работы по камерной сушке крупномерных пило- и лесоматериалов были начаты в середине 1940–1950 гг. и проводятся в настоящее время отечественными и зарубежными предприятиями и организациями. Для этого применяются конвективные сушильные камеры, камеры с использованием энергии электрического поля сверхвысоких частот (СВЧ) и энергии магнитного поля токов высокой частоты (ТВЧ), вакуум, гидрофобные жидкости и т. д. [1–3]. На кафедре «Сушка и защита древесины» МГУЛ в 2007 г. проводились экспериментальные сушки с использованием поля СВЧ единичных сортиментов бруса сечением 150×150 мм и оцилиндрованного бревна диаметром 220 мм в сушильной камере, оснащенной восемью магнетронами, которые работали на частоте 2450 МГц, при общей колебательной мощности 3,8 кВт. Полученные результаты позволили сделать следующие выводы:

– процесс сушки проходит без образования крупных трещин;

– продолжительность сушки единичных сортиментов до средней комнатной влажности 14 %, составляет не более 2 ч;

– влажность на поверхности сортиментов всегда выше влажности центральных зон [4].

Кроме того, в 2012 г. Государственный научный центр лесопромышленного комплекса и Воронежская государственная лесотехниче-

ская академия разработали способ сушки бревен (бруса) с применением электромагнитной энергии сверхвысокой частоты СВЧ и создали установку СВЧ для целей деревянного домостроения [5]. На установке было высушено 12 бревен объемом 3,5 м<sup>3</sup> от начальной влажности 100 % до конечной влажности 15 % при затрате электроэнергии 28 кВт×час. В процессе сушки основная масса воды выходила из бревна (бруса) в жидкой фазе, а не в виде пара.

В работе [6] приведено описание способа и технологии вакуум-осциллирующей сушки в среде перегретого пара применительно к оцилиндрованным бревнам. Способ сушки заключается в чередовании процессов вакуумирования и конвективного нагрева материала. По окончании стадии вакуумирования цикл «прогрев — вакуум» повторяется. Количество циклов зависит от диаметра бревна, конечной влажности и породы древесины.

Для оцилиндрованных бревен также была предложена технология осциллирующей сушки в гидрофильных жидкостях. Процесс сушки включает в себя чередующиеся операции нагрева древесины в гидрофильной жидкости и вакуумирования. При этом наибольший эффект можно достичь при сушке пихты, вследствие ее высокой стойкости к увлажнению в ходе операции прогрева. Указанную технологию можно использовать для удаления влаги из умеренно- и труднопропитываемых пород древесины [7].

Способ сушки оцилиндрованного бревна, рассмотренный в работе [8], заключается в том, что по всей длине бревна для ускорения нагрева бревна и облегчения выхода испаряемой из бревна влаги равномерно сверлят сквозные отверстия в поперечном направлении, в результате при 10 отверстиях на 1 м длины бревна продолжительность сушки от начальной влажности 23 % до конечной влажности 12 % составляет 100 ч. По мнению авторов этой работы, наличие сквозных отверстий способствует быстрому и равномерному нагреву бревна и обеспечивает одновременную усушку волокон центральной и периферийной частей бревна, уменьшает внутренние напряжения в древесине и предотвращает образование трещин на поверхности.

### Цель работы

Цель работы — разработка технологии импульсной сушки крупномерных пило- (бруса) и лесоматериалов (окоренных и оцилиндрованных бревен) в сушильных камерах конвективного принципа действия.

### Материалы и методы исследования

На кафедре «Процессы и аппараты» МГУЛ в апреле–июле 2014 г. проводились научно-исследовательские работы по сушке бруса сечением 100×100 и 100×150 мм, длиной до 2 м в конвективной сушильной камере с поперечно-горизонтальной циркуляцией. Использовались импульсные режимы, хорошо зарекомендовавшие себя при сушке хвойных и лиственных пород древесины [9, 10]. Всего было высушено 10 образцов бруса от начальной влажности 57,92 до конечной влажности 11,26 %. Продолжительность сушки бруса составила 7...20 сут. Для локализации трещин усушки в образцах бруса выпиливали 2–4 иницирующие паза шириной от 1 до 2,8 мм, глубиной 10...50 мм.

Импульсный режим включал в себя следующие технологические операции: прогрев, сушка и кондиционирование. Продолжительность прогрева составила 6...8 ч при температуре от 60 до 70 °С и относительной влажности воздуха 95...99 %. Процесс сушки состоял из повторяющихся циклов «работа» и «пауза» продолжительностью соответственно 2 и 4 ч. При цикле «работа» температура по «сухому термометру» устанавливалась в диапазоне от 55 до 65 °С. Продолжительность кондиционирования при температуре 60...70 °С составляла 4...6 ч. В процессе всей сушки проводился контроль текущей влажности образцов (по секциям влажности), послойной влажности и сушильных напряжений по силовым секциям [11].

В январе–июне 2015 г. и в феврале–мае 2017 г. проводились опытные сушки бруса сечением

150×150 мм и длиной до 2 м. Январь–июнь 2015 г. высушивался брус без сердцевинной трубки, а с февраля по май 2017 г. брус с сердцевинной трубкой. Начальная влажность определялась сушильно-весовым способом по ГОСТ 16588 и составляла от 50 до 70 %. Всего было выполнено 10 сушек. Продолжительность сушек до конечной влажности 14–21 % составила 8...17 сут. Использовались импульсные режимы сушки, которые включали в себя следующие технологические операции: прогрев, сушку и кондиционирование. Продолжительность прогрева составляла 8...10 ч при температуре от 40...60 °С и относительной влажности воздуха 95...99 %. Процесс сушки состоял из повторяющихся циклов «работа» и «пауза». Продолжительность цикла «работа» 1...3 ч, при температуре 50...80 °С, продолжительность цикла «пауза» 4...8 ч. Продолжительность кондиционирования составляла 6...8 ч при температуре 60...80 °С. В процессе сушки контролировалось изменение текущей и послойной влажности и относительная деформация силовых секций [12, 13].

С сентября 2018 г. по апрель 2019 г. в лаборатории кафедры «Древесиноведение и технологии деревообработки» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал) проводились опытные сушки бруса сечением 200×200 мм и длиной до 2 м импульсными режимами. Всего было проведено 10 сушек. Процесс сушки включал в себя следующие технологические операции: прогрев, сушку и кондиционирование. Продолжительность прогрева составляла 10...20 ч при температуре от 50 до 60 °С и относительной влажности воздуха 95...99 %. Сушка состояла из повторяющихся циклов «работа» и «пауза». Продолжительность цикла «работа» составляла 1...2 ч при температуре от 35 до 77 °С, продолжительность цикла «пауза» составляла 6...8 ч. Продолжительность кондиционирования составляла 10...18 ч при температуре 60...77 °С. Продолжительность сушки образцов бруса от начальной влажности 68,5 % до конечной влажности 12,6 % составила 21...35 сут. После кондиционирования образцы бруса выдерживались в сушильной камере не менее 20 ч. В процессе сушки бруса осуществлялся контроль текущей влажности, размеров трещин (длины, ширины и глубины) и относительной деформации зубцов силовых секций [14].

С ноября 2017 г. по май 2018 г. на кафедре «Древесиноведение и технологии деревообработки» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал) проводились экспериментальные работы по сушке оцилиндрованного бревна диаметром 200 мм, длиной 1,5 м. Всего было выполнено восемь сушек. Использовалась опытно-промышленная сушильная камера с поперечно-горизонтальной циркуляцией, конвективного принципа действия.

Для проведения сушек импульсным режимом камеру оснастили регулятором температуры, таймером, психометрическим узлом (сухим и мокрым термометрами сопротивления) и системой увлажнения с приточно-вытяжными каналами.

Импульсный режим включал в себя следующие технологические операции: прогрев, сушку и кондиционирование. Продолжительность прогрева составляла 10...20 ч, при температуре 40...50 °С, и относительной влажности воздуха 95...99 %. Продолжительность цикла «работа» и «пауза» составляла соответственно 2 и 4 ч. Температура цикла «работа» устанавливалась в диапазоне от 28 °С с последующим ее ступенчатым повышением до 70 °С. Количество ступеней составляло от 5 до 7. Всего было проведено пять сушек импульсным режимом, высушено шесть образцов сырых бревен. Начальная влажность составляла 57,4 %, конечная — 19,1 %. Продолжительность кондиционирования составляла 14...16 ч при температуре 50...70 °С. Продолжительность сушки оцилиндрованных бревен составляла 24...40 сут. В процессе сушки контролировались послойная влажность образцов, размеры трещин усушки (длина, ширина, глубина), изучалось влияние компенсационных пропилов на динамику образования трещин усушки [15, 16].

С ноября 2018 г. по апрель 2019 г. проводились опытные сушки оцилиндрованного бревна из древесины сосны диаметром 220 мм, длиной 1,5 м импульсным режимом в опытно-промышленной сушильной камере. Всего выполнено пять сушек, высушено восемь образцов сырого оцилиндрованного бревна. Импульсный режим включал в себя следующие технологические операции: прогрев, сушка и кондиционирование. Продолжительность прогрева составляла 28...30 ч при температуре 38...48 °С и относительной влажности воздуха 95...99 %. Продолжительность цикла «работа» составляла 1...3 ч при начальной температуре 30 °С с последующим ее ступенчатым повышением до 69 °С. Количество ступеней составляло от 7 до 9. Продолжительность цикла «пауза» 4...6 ч. Кондиционирование осуществлялось при температуре от 60 до 68 °С, продолжительностью 18...22 ч. В процессе сушки проводился контроль послойной влажности образцов оцилиндрованного бревна, определялись размеры трещин усушки (длина, ширина и глубина) в зависимости от режимных параметров процесса сушки, изучалось влияние компенсационных пропилов на сохранение целостности образцов оцилиндрованных бревен.

В октябре 2017 г. корпорация «RusDrevProm» (г. Серов Свердловской области), изготавливающая деревянные опоры для линий электропередач, предоставила образцы окоренных бревен

из древесины сосны диаметрами 180, 200, 220, 240, 260 и 280 мм длиной 2 м для исследования возможности применения импульсных режимов в технологическом процессе их изготовления. Технологический процесс изготовления деревянных опор включает в себя окорку бревен, сушку в конвективных камерах до влажности не более 28 % с последующей пропиткой водорастворимыми антисептиками на основе меди, мышьяка и хрома на глубину 30...40 мм способом вакуум — давление — вакуум. Требования к качеству высушенных материалов определены по ГОСТ 9463 и стандартом ПАО «РОССЕТИ» начальная влажность образцов составляла от 40,5 до 6,2 %. Импульсный режим включал в себя следующие технологические операции: прогрев, сушка и кондиционирование. Продолжительность прогрева 18...20 ч, при температуре 40...60 °С и относительной влажности воздуха 95...99 %. Продолжительность циклов «работа» и «пауза» зависела от диаметра образца и составляла 2 ч для цикла «работа» и от 4 до 6 ч для цикла «пауза». Температура цикла «работа» определялась диаметром образца и для диаметра 180 мм находилась в диапазоне от 40 до 70 °С, для диаметра 200 мм — от 38 до 60 °С, 220 мм — 50 °С, 240 мм — от 30 до 50 °С, 260 мм — от 28 до 48 °С и при диаметре 280 мм — от 40 до 70 °С. В процессе сушек измеряли длину, ширину и глубину трещин усушки в соответствии с ГОСТ 9463. Анализ полученных данных показал, что высушенные образцы окоренных бревен соответствуют требованиям по качеству, а импульсные режимы могут быть опробованы в производственных условиях [17].

С сентября 2018 г. по апрель 2019 г. в лаборатории кафедры «Древесиноведение и технологии деревообработки» проводились опытные сушки окоренных бревен из древесины липы диаметром 320...350 мм и длиной до 2 м.

Древесина липы — мягкая, имеет однородное строение, хорошо режется и используется для изготовления моделей для литья и разных изделий различного назначения. Технологический процесс изготовления резных изделий из окоренного бревна состоит из атмосферной сушки (не менее 3 лет) под навесом, досушки в раскройном помещении, торцовки и раскалывания бревен на заготовки. В целях сокращения продолжительности сушки окоренных бревен из липы с сентября 2018 г. по апрель 2019 г. были проведены сушки в опытно-промышленной сушильной камере с использованием импульсных режимов. Ранее режимы хорошо зарекомендовали себя при сушке сосновых окоренных бревен для изготовления опор линий электропередач [17, 18, 19, 20]. Импульсный режим включал в себя следующие

технологические операции: прогрев, сушка и кондиционирование. Продолжительность прогрева составляла от 18 до 20 ч при температуре от 40 до 63 °С и относительной влажности воздуха 95...99 %. Импульсная сушка включала в себя циклы «работа» и «пауза». Температура цикла «работа» поддерживалась в диапазоне от 35 до 77 °С. На этой стадии осуществлялось ступенчатое изменение температуры, количество ступеней от 6 до 9. Высушено пять образцов. Продолжительность циклов «работа» и «пауза» составляла 4...6 ч.

Контроль текущей влажности осуществлялся сушильно-весовым способом по ГОСТ 16588. В процессе всех пяти сушек проводилось измерение длины, ширины и глубины боковых и торцовых трещин по ГОСТ 9463.

Продолжительность сушки образцов от начальной влажности 44,7 % до конечной влажности 18 % составляла 18...46 сут.

## Результаты и обсуждение

По результатам опытных сушек образцов бруса импульсными режимами получены данные по изменению текущей и послойной влажности, значениям условного показателя остаточных напряжений (относительной деформации зубцов силовых секций), размерам трещин усушки и компенсационного пропила, величина температуры и относительной влажности агента сушки в процессе повторяющихся циклов «работа» и «пауза».

Импульсная сушка образцов оцилиндрованных бревен диаметром 200 и 220 мм, а также образцов окоренных бревен из древесины сосны и липы позволила получить данные по изменению текущей и послойной влажности, размерам боковых и торцевых трещин усушки и состояние агента сушки в процессе повторяющихся циклов «работа» и «пауза».

## Выводы

Проведенные исследования и полученные данные позволили разработать технологию импульсной сушки для брусков сечениями 100×100, 100×150, 150×150 мм и 200×200 мм, оцилиндрованных бревен из сосны, используемых для изготовления опор линий электропередач и окоренных бревен из древесины липы. Разработанные технологии импульсной сушки необходимо апробировать в условиях промышленного производства.

Внедрение импульсной сушки предполагает сокращение тепловой и электрической энергии (от 30 до 40 %) за счет отключения циркуляционных вентиляторов в цикле «пауза», обеспечивая при этом бездефектную сушку древесины.

## Список литературы

- [1] Селюгин Н.С. Сушка древесины. Л.: Гослестехиздат, 1940. 548 с.
- [2] Бирюков В.А. Технология скоростной сушки сосновых брусков с применением диэлектрического и конвекционного нагрева: дис. ... канд. тех. наук. Л., 1951, 177 с.
- [3] Дьяконов К.Ф., Горяев А.В. Сушка древесины токами высокой частоты. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 168 с.
- [4] Расев А.И. Микроволновая сушка древесных сортиментов (брус, оцилиндрованное бревно) // Науч. тр. МГУЛ. Вып. 335, 2007. С. 47–49.
- [5] Богданов Е.С., Козлов В.А., Кунтыш В.Б., Мелехов В.И. Справочник по сушке древесины. М.: Лесная пром-сть, 1990. 304 с.
- [6] Сафин Р.Р., Хасаншин Р.Р., Хайдаров С.А., Сафин Р.Г. Сушка в технологическом процессе производства оцилиндрованных бревен домостроения. Казань: КГУ, 2004. С. 160–163.
- [7] Расев А.И., Курышов Г.Н. Технология сушки пиломатериалов в аэродинамических камерах // Деревообработка в России, 1998. № 1. С. 3–4.
- [8] Лукаш А.А., Гришина Е.С. Интенсификация процесса сушки оцилиндрованных бревен // ИВУЗ Лесной журнал, 2014. № 2. С. 86–93.
- [9] Расев А.И., Курышов Г.Н., Чучков С.А., Ляшенко С.В. Способ сушки пиломатериалов. Пат. 2027127 РФ МПК F26B3/04 / Заявитель и патентообладатель МГУЛ, опубл. 20.01.95 г. Бюл. № 35.
- [10] Косарин А.А. Технология импульсной сушки пиломатериалов: дис. ... канд. техн. наук. М.: МГУЛ, 2012. 164 с.
- [11] Петяйкина Е.Г., Курышов Г.Н., Косарин А.А. Импульсная сушка бруса хвойных пород древесины // Науч. тр. МГУЛ. Вып. 370, 2014. С. 61–66.
- [12] Самойлова Е.А., Курышов Г.Н., Косарин А.А. Импульсная сушка крупных древесных сортиментов (брус сечением 150×150 мм) // Научные труды МГУЛ. Вып. 381, 2016. С. 67–70.
- [13] Курышов Г.Н., Косарин А.А., Расева Е.А. Способ импульсной сушки пиломатериалов. Пат. № 2607923 РФ / Заявитель и патентообладатель МГУЛ, опубл. 11.01.2017 г. Бюл. № 2.
- [14] Косарин А.А., Курышов Г.Н., Расева Е.А. Способ импульсной сушки пиломатериалов. Пат. № 2615854 РФ / Заявитель и патентообладатель МГУЛ, опубл. 01.12.2017 г. Бюл. № 34.
- [15] Новичков М.П., Курышов Г.Н., Косарин А.А. Импульсная сушка оцилиндрованного бревна // Тез. докл. науч.-техн. конф. МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана (июнь 2017, Красноярск). Красноярск: Научно-инновационный центр, 2017. 244 с.
- [16] Курышов Г.Н., Косарин А.А., Косарина А.А. Способ импульсной сушки. Пат. № 2637288 РФ / Заявитель и патентообладатель Курышов Г.Н., Косарин А.А., Косарина А.А., опубл. 01.12.2017. Бюл. № 34.
- [17] Иванов Д.А., Курышов Г.Н., Косарин А.А. Импульсная сушка окоренного бревна // Сб. тез. докл. Всерос. студ. конф. «Студенческая научная весна» (МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, апрель 2018). М.: Издательский дом «Научная библиотека», 2018. 506 с.
- [18] Минина Е.А., Чемоданов А.Н. Современные проблемы сушки лесоматериалов // Veda a technologie: krok do budoucnosti – 2016, Materialy XII Mezinarodni Vedecko-Prakticka Konference «Moderní Vymoženosti Vědy – 2016» (Praha, 22–30 января 2016 г.). Praha: Publishing House «Education and Science», 2016, pp. 81–83.
- [19] Расев А.И. Сушка древесины. М.: Лань, 2010. 416 с.
- [20] Серговский П.С. Гидротермическая обработка и консервирование древесины. М.: Лесная пром-сть, 1968. 448 с.

## Сведения об авторах

**Галкин Владимир Павлович** — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), [vgalkin@mgul.ac.ru](mailto:vgalkin@mgul.ac.ru)

**Курьшов Григорий Николаевич** — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), [kuryshov@mgul.ac.ru](mailto:kuryshov@mgul.ac.ru)

**Косарин Анатолий Александрович** — канд. техн. наук, доцент, заместитель директора ООО «Форсклад», [kosarin2008@yandex.ru](mailto:kosarin2008@yandex.ru)

**Моисеев Сергей Андреевич** — студент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), [d.dejanov@yandex.ru](mailto:d.dejanov@yandex.ru)

**Деянов Дмитрий Игоревич** — студент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), [d.dejanov@yandex.ru](mailto:d.dejanov@yandex.ru)

Поступила в редакцию 29.12.2019.

Принята к публикации 23.01.2020.

## LARGE SIZED WOOD AND TIMBER SEASONING

V.P. Galkin<sup>1</sup>, G.N. Kuryshov<sup>1</sup>, A.A. Kosarin<sup>2</sup>, S.A. Moiseev<sup>1</sup>, D.I. Deyanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

<sup>2</sup>ООО «Форсклад», 40, Partizanskaya st., Moscow, 121359, Russia

[kosarin2008@yandex.ru](mailto:kosarin2008@yandex.ru)

A review of publications on seasoning large-sized wood and timber (timber, logs) in drying chambers using the energy of super-high frequency electric field in an environment of superheated steam, hydrophilic liquids, vacuum in combination with convective heating of wood is presented. A description of the seasoning process in the period from 2014 to 2019 in a convective pilot industrial drying chamber equipped with pulse modes in the laboratory of the Department of Wood Science and Woodworking Technology at Mytishchi branch of MSTU named after N.E. Bauman. Single timber assortments of 100 × 100, 100 × 150, 150 × 150 and 200 × 200 mm sections up to 2 m long, as well as logs with a diameter of 200 and 220 mm and 2 m long, were subjected to seasoning. In addition, samples were dried using pulsed modes barked pine wood logs with a diameter of 180 to 280 mm used for the manufacture of power lines wooden poles. In the same period, pulsed drying was carried out on samples of barked linden wood with a diameter of 320 to 350 mm. In the course of all dryings, the initial, current, layer-by-layer and final humidity was determined in accordance with GOST 16588, the influence of operating parameters on the dimensions of drying cracks was studied. It was concluded that pulsed conditions can be used in manufacture conditions.

**Keywords:** large-sized lumber, timber, large-sized timber, round and barked logs, impulse drying, drying modes

**Suggested citation:** Galkin V.P., Kuryshov G.N., Kosarin A.A., Moiseev S.A., Deyanov D.I. *Sushka крупномерных пило- и лесоматериалов* [Large sized wood and timber seasoning]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 2, pp. 51–56. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-51-56

## References

- [1] Selyugin N.S. *Sushka drevesiny* [Wood drying]. Leningrad: Goslestekhizdat, 1940, 548 p.
- [2] Biryukov V.A. *Tekhnologiya skorostnoy sushki sosnovykh brus'ev s primeneniem dielektricheskogo i konveksionnogo nagrev* [Technology of high-speed drying of pine beams using dielectric and convection heating] Diss. Cand. Sci. (Tech.). Leningrad, 1951, 177 p.
- [3] D'yakonov K.F., Goryaev A.V. *Sushka drevesiny tokami vysokoy chastoty* [Drying wood with high frequency currents]. Moscow: Lesn. prom-st' [Forest industry], 1981, 168 p.
- [4] Rasev A.I. *Mikrovolnovaya sushka drevesnykh sortimentov (brus, otsilindrovannoe brevno)* [Microwave drying of wood assortments (timber, logs)] Nauchnye trudy MGUL [Scientific works of Moscow State Forest University], 2007, v. 335, pp. 47–49.
- [5] Bogdanov E.S., Kozlov V.A., Kuntyshev V.B., Melekhov V.I. *Spravochnik po sushke drevesiny* [Handbook of wood drying]. Moscow: Lesnaya prom-st' Publ. [Forest Industry], 1990, 304 p.
- [6] Safin R.R., Khasanshin R.R., Khaydarov S.A., Safin R.G. *Sushka v tekhnologicheskoy protsesse proizvodstva otsilindrovannykh breven domostroeniya* [Drying in the manufacturing process of rounded logs of house building]. Kazan: KSU, 2004, pp. 160–163.
- [7] Rasev A.I., Kuryshov G.N. *Tekhnologiya sushki pilomaterialov v aerodinamicheskikh kamerakh* [Technology of drying sawn timber in aerodynamic chambers]. Woodworking in Russia, 1998, no. 1, pp. 3–4.
- [8] Lukash A.A., Grishina E.S. *Intensifikatsiya protsessa sushki otsilindrovannykh breven* [The intensification of the drying process of logs]. *IVUZ Lesnoy zhurnal [IVUZ Forest Journal]*, 2014, no. 2, pp. 86–93.
- [9] Rasev A.I., Kuryshov G.N., Chuchkov S.A., Lyashenko S.V. *Sposob sushki pilomaterialov* [The method of drying lumber]. Pat. 2027127 RF IPC F26B3. 04. applicant and patent holder MGUL, publ. 01/20/95, Bull. 35.

- [10] Kosarin A.A. *Tekhnologiya impul'snoy sushki pilomaterialov* [Pulse drying technology for lumber]. Diss ... Cand. Sci. Tech. Moscow: MGUL, 2012, 164 p.
- [11] Petyaykina E.G., Kuryshov G.N., Kosarin A.A. *Impul'snaya sushka brusa khvoynykh porod drevesiny* [Pulse drying of coniferous timber timber] Nauchnye trudy MSFU [Scientific works of Moscow State Forest University], 2014, iss. 370, pp. 61–66.
- [12] Samoylova E.A., Kuryshov G.N., Kosarin A.A. *Impul'snaya sushka krupnykh drevesnykh sortimentov (brus secheniem 150×150 mm)* [Pulse drying of large wood assortments (timber with a cross-section of 150 × 150 mm)] Nauchnye trudy MGUL [Scientific works of Moscow State Forest University], 2016, iss. 381, pp. 67–70.
- [13] Kuryshov G.N., Kosarin A.A., Raseva E.A. *Sposob impul'snoy sushki pilomaterialov* [The method of pulsed drying of lumber]. Pat. No. 2607923 of the Russian Federation. Applicant and patent holder of Moscow State Forest University, publ. January 11, 2017, bull. 2.
- [14] Kosarin A.A., Kuryshov G.N., Raseva E.A. *Sposob impul'snoy sushki pilomaterialov* [The method of pulsed drying of lumber]. Pat. No. 2615854 of the Russian Federation. Applicant and patent holder of Moscow State Forest University, publ. 12/01/2017, bull. 34.
- [15] Novichkov M.P., Kuryshov G.N., Kosarin A.A. *Impul'snaya sushka otsilindrovannogo brevna* [Pulse drying of logs] Tezisy dokladov. Nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya MF MGTU im. Baumana N.E. Iyun' 2017 [Abstracts of reports. Scientific and Technical Conference of the Moscow State Technical University named after Bauman N.E.], June 2017. Krasnoyarsk: Research and Innovation Center, 2017, 244 p.
- [16] Kuryshov G.N., Kosarin A.A., Kosarina A.A. *Sposob impul'snoy sushki* [Pulse drying method]. Pat. No. 2637288 RF. Applicant and patent holder Kuryshov G.N., Kosarin A.A., Kosarina A.A., publ. 12/01/2017, bull. 34.
- [17] Ivanov D.A., Kuryshov G.N., Kosarin A.A. *Impul'snaya sushka okorenного brevna* [Pulse drying of barked logs] Sbornik tezisov dokladov. Vserossiyskaya studencheskaya konferentsiya «Studencheskaya nauchnaya vesna» [Abstracts of reports. All-Russian Student Conference «Student Scientific Spring»]. Moscow: Scientific Library Publishing House, 2018, 506 p.
- [18] Minina E.A., Chemodanov A.N. *Sovremennye problemy sushki lesomaterialov* [Modern problems of drying timber]. Science and Technology: A Step to the Future – 2016. Materials XII International Science-Practical Conference. «Moderní Vymoženosti Vědy – 2016», Praha, 22–30 yanvarya 2016 g. Praha: Publishing House «Education and Science», 2016, pp. 81–83.
- [19] Rasev A.I. *Sushka drevesiny* [Hydrothermal treatment and preservation of wood]. Moscow: Lan', 2010, 416 p.
- [20] Sergovskiy P.S. *Gidrotermicheskaya obrabotka i konservirovanie drevesiny* [Hydrothermal treatment and preservation of wood]. Moscow: Lesnaya prom-st' Publ. [Forest Industry], 1968, 448 p.

## Authors' information

**Galkin Vladimir Pavlovich** — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch),

**Kuryshov Grigoriy Nikolaevich** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), kuryshov@mgul.ac.ru

**Kosarin Anatoliy Aleksandrovich** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Deputy Director «Forcklad», kosarin2008@yandex.ru

**Moiseev Sergey Andreevich** — Student of the BMSTU (Mytishchi branch), d.dejanov@yandex.ru

**Dejanov Dmitriy Igorevich** — Student of the BMSTU (Mytishchi branch), d.dejanov@yandex.ru

Received 29.12.2019.

Accepted for publication 23.01.2020.

## К ВОПРОСУ СТАНДАРТИЗАЦИИ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ БЛЕСКА ПРОЗРАЧНЫХ ЛАКОВЫХ ПОКРЫТИЙ НА ДРЕВЕСИНЕ И ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Б.М. Рыбин<sup>1</sup>, И.А. Завражнова<sup>1</sup>, Д.Б. Рыбин<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>ООО «Тимберланд», 141805, Московская обл., Дмитровский р-н, рабочий поселок Некрасовский, ул. Северная, д. 10

rybin@mgul.ac.ru

В основу разработки государственного стандарта на метод определения блеска высокоглянцевых, глянцевых и матовых покрытий был положен стандарт ИСО 2813: 2014. В нем предусматривается использование блескомеров с различными углами падения-отражения света 20°, 60° и 85°. Известно, что при определении блеска покрытий на древесной подложке необходимо корректировать показания блескомеров на светлоту древесины. Это вызвано тем, что на фотоприемник попадают не только лучи света, отраженные поверхностью контролируемого покрытия, но и лучи, прошедшие прозрачное покрытие и отраженные древесной подложкой. Чем больше светлота поверхности древесины, тем выше показания блескомера при прочих равных условиях состояния поверхностей контролируемых покрытий. Для учета влияния светлоты поверхности древесины предлагается в разрабатываемом стандарте использовать блескомер с углом падения-отражения света 45°. С помощью него будет возможно определить диффузную составляющую отраженного света от поверхности древесины и скорректировать по ней показания блескомеров. Для блескомера с углом падения-отражения света 20°, используемого для определения блеска высокоглянцевых покрытий, такая коррекция показаний составит 20 % от величины диффузной составляющей. Для блескомера на 60°, используемого для определения блеска глянцевых покрытий, коррекция показаний составит 10 % от величины диффузной составляющей. Блескомер на угол 85° предлагается для оценки блеска матовых покрытий. Его показания не корректируются на светлоту древесины, т. к. при таком угле падения-отражения света величина диффузной составляющей от древесины незначительна. Унификация методик определения блеска прозрачных покрытий, использование равнозначных блескомеров, а также детальная проработка факторов, оказывающих влияние на точность приборной оценки, делает предлагаемый государственный стандарт конкурентно способным как в отечественной так и в зарубежной практике для оценки качества покрытий по блеску поверхностей на деталях, узлах и изделиях из древесины и древесных материалов.

**Ключевые слова:** блеск покрытия, светлота древесины, стандартизация метода

**Ссылка для цитирования:** Рыбин Б.М., Завражнова И.А., Рыбин Д.Б. К вопросу стандартизации метода определения блеска прозрачных лаковых покрытий на древесине и древесных материалах // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 2. С. 57–67. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-57-67

В настоящее время ГОСТ 16143–81 «Детали и изделия из древесины и древесных материалов. Метод определения блеска прозрачных лаковых покрытий» предусматривает оценку блеска глянцевых и высокоглянцевых покрытий по степени отражения света. Матовые покрытия по этому стандарту не подлежат оценке по блеску контролируемой поверхности.

К высокоглянцевым (зеркальным) относят покрытия с очень гладкой поверхностью, на которой высота неровностей составляет менее половины длины волны видимого светового излучения (менее 0,25 мкм). Такие поверхности покрытий зеркально без искажения отражают падающие лучи света.

К глянцевым относят покрытия, обладающие наряду с направленным отражением падающих лучей света некоторым диффузным отражением. Высота неровностей на таких покрытиях более 0,25 мкм, но менее 1,5 мкм.

Матовые покрытия на древесине и древесных подложках характеризуются практически диффузным отражением падающего света, высота

неровностей на поверхности которых составляет более 1,5 мкм. Такие покрытия в своем составе содержат мелкодисперсные добавки. С их помощью на поверхности наблюдаются неровности с регулярным шагом, дающие матовый эффект, выражающийся в диффузном отражении света.

Оценка блеска контролируемых высокоглянцевых, глянцевых и матовых покрытий в технологии деревообработки осуществляется с использованием различных методов и приборов.

Для оценки глянцевых покрытий, по ГОСТ 16143–81 используют рефлектоскопический метод, основанный на определении степени искажения контуров светящегося тела при отражении от контролируемой поверхности покрытия. В качестве прибора используется рефлектоскоп Р-4, где светящимся телом являются 10 рядов цифр, уменьшающихся по высоте от ряда к ряду. Оценочный показатель блеска поверхности контролируемого покрытия представляет собой ряд цифр, которые читаются все до единой. На глянцевых покрытиях, отличающихся по степени блеска,

вследствие всевозможного вида неровностей, по рефлекскопу Р-4 можно наблюдать различные ряды — от первого до десятого. Это служит мерой блеска для глянцевых покрытий. Если читаются цифры десятого ряда, то покрытия можно отнести к высокоглянцевым. Для них стандарт предусматривает определение блеска с помощью фотоэлектрического блескомера ФБ-2. Прибор работает на основе метода определения блеска покрытия, фиксируя фотоприемником величину фототока при отражении света от контролируемой поверхности. Поскольку в приемник блескомера попадают лучи света, отраженные не только от покрытия, но и прошедшие толщину прозрачной лаковой пленки и отраженные от поверхности древесины, необходимо корректировать полученные значения на светлоту отделяемой поверхности. Для этого у блескомера ФБ-2 имеется возможность определения диффузно отраженного света и с помощью этого показателя скорректировать блеск покрытия по прибору.

Указанные выше приборы Р-4 и ФБ-2 в настоящее время промышленность не выпускает, что осложняет проведение оценочных испытаний блеска контролируемых поверхностей высокоглянцевых и глянцевых покрытий.

Для оценки матовых покрытий в отечественной практике [1–5] рекомендуется отражательную способность контролируемой поверхности характеризовать параметром шероховатости, т. е. средним арифметическим отклонением профиля неровностей. Для этой цели можно использовать профилометры или профилографы-профилометры с определенным диапазоном измерения параметров шероховатости.

В зарубежной и отечественной практике применения лакокрасочных покрытий для оценки блеска контролируемых поверхностей (ГОСТ Р 52663–2006, ISO 2813:2014) предлагается использовать систему блескомеров с различными углами падения — отражения света — 20°, 60° и 85°. В лакокрасочной отрасли, как правило, такие испытания проводят для покрытий на определенной подложке. Часто для этого используют фотостеклянные пластинки, на поверхности которых формируются защитно-декоративные покрытия. Чтобы определить блеск подготовленного покрытия на фотостекле, пластинку укладывают на черную поверхность фотобумаги и снимают блеск контролируемого покрытия.

В случае если покрытие на реальной поверхности, например на древесине, то показания блескомеров необходимо корректировать на светлоту поверхности древесины [6–8].

## Цель работы

Целью данной работы являлась гармонизация национального стандарта на метод определения

блеска прозрачных покрытий с международными с учетом проведения испытаний на древесной подложке.

## Материалы и методы

Для проведения испытаний в экспериментах были использованы различные по степени отражения света покрытия: высокоглянцевые, глянцевые и матовые, подготовленные на основе различных пленкообразователей. В качестве отделяемых поверхностей применялась древесина и древесные материалы различных пород. Отличительным признаком для всех служила различная светлота отделяемой поверхности.

За основу оценки блеска контролируемых поверхностей использовался метод определения степени отражения света по величине фототока, возбуждаемого в фотоприемнике под действием зеркально отраженных лучей от поверхности покрытия под определенным углом.

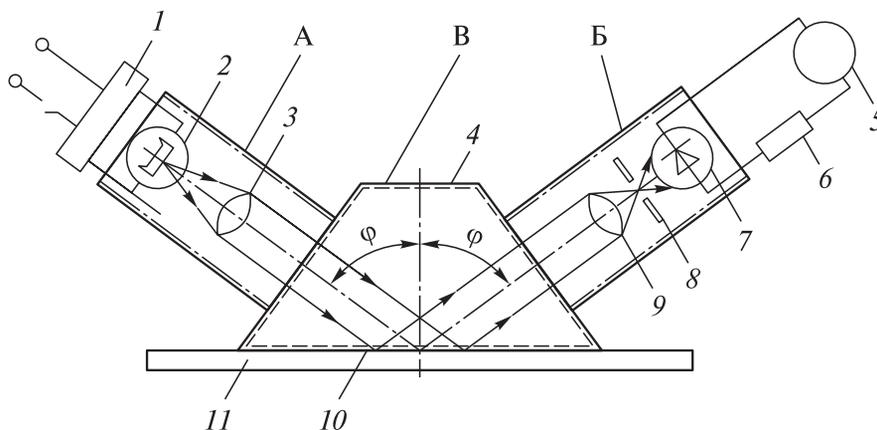
В качестве приборов предлагается использовать блескомеры, выпускаемые ННТП «Термо-конт», — БФ5М-60/60, БФ5М-20/20, БФ5М-85/85, БФ5М-45/0 или другие подобные.

В условном обозначении моделей блескомеров последние четыре цифры через разделительную черту указывают углы соответственно падения — отражения света, при которых проводятся измерения блеска.

Блескомер БФ5М-45/0 определяет диффузную составляющую отраженного света, что дает возможность скорректировать блеск на светлоту отделяемой поверхности.

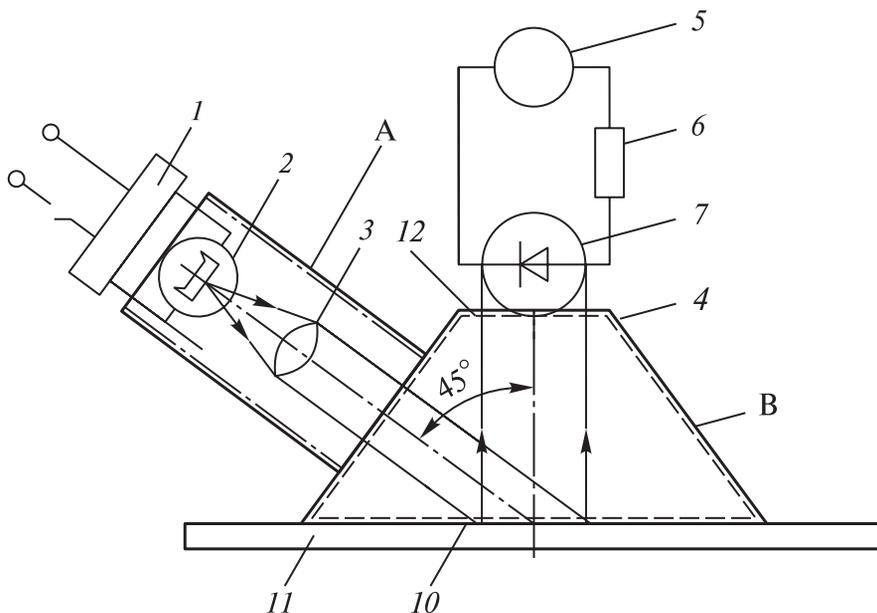
В основе конструкции блескомеров БФ5М-20/20; БФ5М-60/60 и БФ5М-85/85 (рис. 1) имеется тубус с осветителем и фотодиодом и головка блескомера. Падающий и отраженный световые потоки корректируют соответствующие линзы, и отраженный свет проходит диафрагму. Аналого-цифровой преобразователь позволяет осуществлять настройку прибора и снимать показания по информационному дисплею. Отличительной особенностью в характеристике блескомеров является угол  $\varphi$  падения — отражения света индивидуальный для каждого блескомера, т. е. 20°, 60° и 85°

Конструкция блескомера БФ5М-45/0 (рис. 2) несколько отличается от конструкций блескомеров, приведенных на рис. 1: в его головке в верхней части есть отверстие для установки фотоприемника. Благодаря такому расположению можно определять отраженный световой поток под нормальным углом к контролируемой поверхности. Этот световой поток характеризует диффузно отраженный свет и позволяет корректировать показания блеска на светлоту поверхности древесной подложки.



**Рис. 1.** Принципиальная конструктивная схема блескомеров БФ5М-20/20; БФ5М-60/60; БФ5М-85/85: А — тубус с осветителем; Б — тубус с фотодиодом; В — головка блескомера; 1 — блок питания; 2 — светодиод; 3, 9 — линзы; 4 — корпус блескомера; 5 — информационный дисплей; 6 — аналого-цифровой преобразователь; 7 — фотодиод; 8 — диафрагма; 10 — отверстие для измерения отраженного света; 11 — контролируемый образец

**Fig. 1.** Design diagram of the BF5M-20/20 gloss meters; BF5M-60/60; BF5M-85/85: А — tube with illuminator; Б — tube with a photodiode; В — the head of the glossmeter; 1 — power supply; 2 — LED; 3, 9 — lenses; 4 — glossmeter housing; 5 — information display; 6 — analog-to-digital Converter; 7 — photodiode; 8 — aperture; 10 — hole for measuring reflected light; 11 — controlled sample



**Рис. 2.** Принципиальная конструктивная схема блескомера БФ5М-45/0 (усл. обозначения те же, что и на рис. 1; 12 — отверстие для измерения диффузно отраженного света)

**Fig. 2.** Schematic diagram of the BF5M-45/0 bright meter (conventional symbol is the same as in Fig. 1; 12 — is a hole for measuring diffusely reflected light)

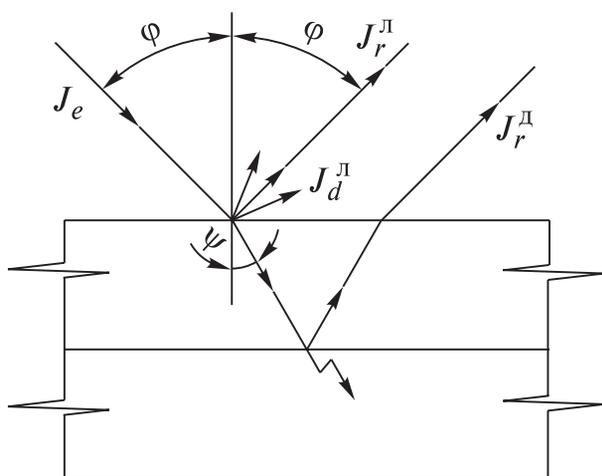


Рис. 3. Схема световых лучей, отраженных лаковым покрытием и поверхностью древесины  
 Fig. 3. Scheme of light rays reflected by varnish and wood surface

Результаты и обсуждение

Используя основные положения фотометрии и схему световых лучей (рис. 3), световой поток  $J$ , отраженный поверхностью покрытия и подложки, можно определить по формуле

$$J = J_r^Л + J_d^Л + J_r^П \tag{1}$$

или

$$J = J_e r e^k + J_e d + J_e (1 - d - r e^k)^2 \tau^{2H} \rho, \tag{2}$$

где  $J_r^Л$  и  $J_d^Л$  — световой поток, соответственно зеркально и диффузно отраженный поверхностью лакового покрытия;

$J_r^П$  — световой поток, отраженный подложкой и прошедший через границу раздела «лаковое покрытие — воздух»;

$J_e$  — падающий световой поток;

$r$  — коэффициент зеркального отражения света полированной поверхностью, образованной из того же материала, что и контролируемая поверхность;

$e$  — основание натуральных логарифмов;

$d$  — коэффициент диффузного отражения света покрытием;

$\tau$  — коэффициент пропускания света лаковым покрытием;

$H$  — толщина лакового покрытия;

$\rho$  — коэффициент отражения света поверхностью подложки.

Преобразования предложенной А. Топорцом формулы [9], выполненные авторами работы [10], позволили для коэффициента  $K$  записать выражение

$$K = -9,7 R_a^2 \frac{\pi \cos^2 \varphi}{2 \lambda^2}, \tag{3}$$

где  $R_a$  — среднее арифметическое отклонение профиля;

$\varphi$  — угол падения света;

$\lambda$  — длина волны падающего света.

Падающий световой поток  $x$  можно определить по формуле

$$J_e = \frac{J_r}{r}, \tag{4}$$

где  $J_r$  — световой поток, зеркально отраженный от контролируемой поверхности.

Коэффициент зеркального отражения света  $r$  можно вычислить по выражению, предложенному О. Френелем:

$$r = 0,5 \left[ \frac{\sin^2(\varphi - \psi)}{\sin^2(\varphi + \psi)} + \frac{\text{tg}^2(\varphi - \psi)}{\text{tg}^2(\varphi + \psi)} \right], \tag{5}$$

где  $\varphi$  — угол падения света;

$\psi$  — угол преломления света.

Согласно закону В. Снеллиуса,

$$\sin \psi = \frac{\sin \varphi}{n}, \tag{6}$$

где  $n$  — показатель преломления света.

Используя формулы (4) — (6), можно определить падающий световой поток  $J_e$ . При этом считаем, что подложка отражает падающие лучи света только с поверхности, т. е. лучи света, прошедшие в подложку, полностью поглощаются. В качестве такой подложки можно рассматривать черную полированную пластинку инфракрасного стекла ИКС-6, являющуюся образцом настройки блескомеров. При показателе преломления ИКС-6 равном 1,567,  $\varphi = 60^\circ$ ,  $\psi = 33^\circ$ ,  $r = 0,1$ . При настройке блескомера на  $J_r = 65$  усл. ед. падающий световой поток составит  $J_e = 65 : 0,1 = 650$  усл. ед.

Зная величину падающего светового потока для различных углов падения — отражения света, можно определить в уравнении (2) произведение  $J_e r$ , коэффициент зеркального отражения  $r$  для лакового покрытия — по уравнению (5) при соответствующих значениях  $n$  и  $\varphi$ .

Используя уравнения (1) — (6) и определенные значения  $J_e r$  для углов падения — отражения света  $20^\circ$ ,  $60^\circ$  и  $85^\circ$ , а также принимая значение  $d = 0$ ,  $\lambda = 0,55$  мкм и  $\tau^{2H} \approx 1$  (условно), световой поток, отраженный поверхностью покрытия и древесиной ( $J_{20}$ ,  $J_{60}$ ,  $J_{85}$ ), можно определить по ниже представленным формулам. Для каждого угла падения — отражения света приведены две формулы на показатели преломления 1,52 и 1,56. Эти значения показателя преломления характеризуют их крайние величины для различных покрытий, приведенные в статьях [11–13]. Формулы определения светового потока, отраженного поверхностью покрытия и древесиной:

$$J_{20}^{1,52} = 56,93 \cdot e^{-44,45R_a^2} + 1324 \cdot (1 - 0,043 \cdot e^{-44,45R_a^2})^2 \cdot \rho; \quad (7)$$

$$J_{20}^{1,56} = 62,74 \cdot e^{-44,45R_a^2} + 1324 \cdot (1 - 0,0473 \cdot e^{-44,45R_a^2})^2 \cdot \rho; \quad (8)$$

$$J_{60}^{1,52} = 59,80 \cdot e^{-12,58R_a^2} + 650 \cdot (1 - 0,092 \cdot e^{-12,58R_a^2})^2 \cdot \rho; \quad (9)$$

$$J_{60}^{1,56} = 63,70 \cdot e^{-12,58R_a^2} + 650 \cdot (1 - 0,098 \cdot e^{-12,58R_a^2})^2 \cdot \rho; \quad (10)$$

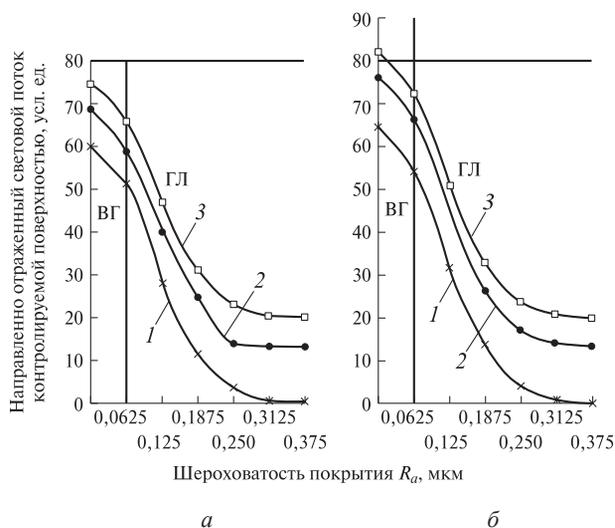
$$J_{85}^{1,52} = 63,85 \cdot e^{-0,38R_a^2} + 104 \cdot (1 - 0,614 \cdot e^{-0,38R_a^2})^2 \cdot \rho; \quad (11)$$

$$J_{85}^{1,56} = 64,27 \cdot e^{-0,38R_a^2} + 104 \cdot (1 - 0,618 \cdot e^{-0,38R_a^2})^2 \cdot \rho. \quad (12)$$

Уравнения (7) — (12) позволяют определить интенсивность направленного отражения светового потока контролируемой поверхности в зависимости от шероховатости покрытий при различных углах падения — отражения света, показателей преломления покрытий и светлоты поверхности древесины. На рис. 4–6 представлены графики, полученные по уравнениям (7) — (12) для углов падения — отражения света 20°, 60° и 85°. Характер графиков для приведенных углов падения — отражения света 20° и 60° одинаков и соответствует значительному уменьшению величины интенсивности отраженного светового потока контролируемой поверхностью с увеличением шероховатости покрытия. Кроме того, чем выше значение светлоты поверхности древесины, тем больше ее влияние на общий отраженный световой поток контролируемой поверхности покрытия. То же относится и к показателю преломления. При большем его значении величина отраженного светового потока становится выше.

Для угла падения — отражения света 85° зависимость направленно отраженного светового потока контролируемой поверхностью от шероховатости покрытия несколько отличается от зависимостей, полученных для углов 20° и 60°. Как следует из рис. 6, графики не имеют такого резкого снижения интенсивности отраженного света с увеличением шероховатости покрытия. Некоторый спад значений наблюдается при шероховатости покрытий более 0,375 мкм. Светлота поверхности древесины и показатель преломления покрытия практически не оказывают влияния на величину общего отраженного светового потока, фиксируемого от контролируемой поверхности покрытия.

На графиках (см. рис. 4–6) приведены также области покрытий по шероховатости их поверхностей. Высокоглянцевые участки находятся в интервале значений шероховатости их поверхностей по параметру  $R_a$  от 0 до 0,0625 мкм, глянцевые — от 0,0625 до 0,375 мкм и матовые в пределах 0,375–0,75 мкм. Указанные интервалы шероховатости поверхностей покрытий и их классификация на высокоглянцевые, глянцевые и



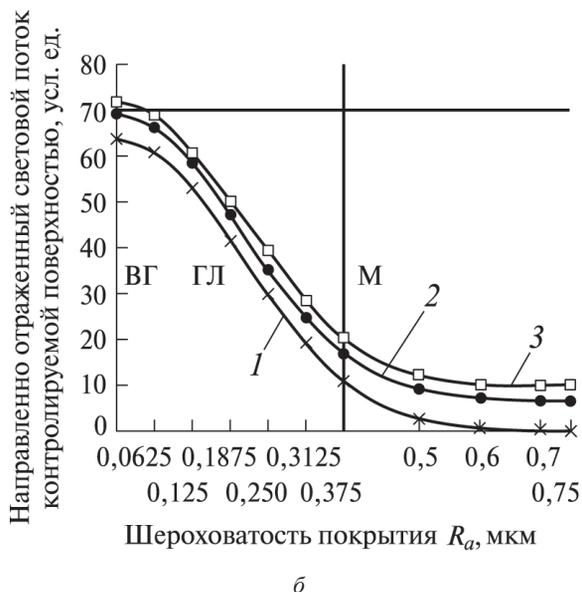
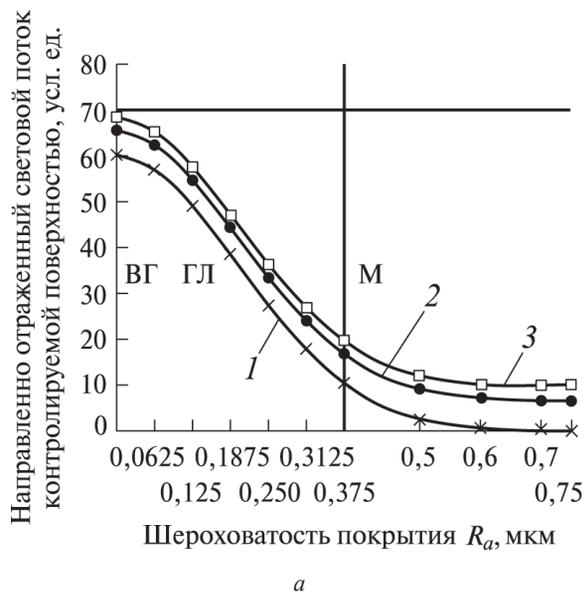
**Рис. 4.** Зависимость направленно отраженного светового потока контролируемой поверхностью от шероховатости покрытия под углом падения — отражения света 20°: показатель преломления покрытия: а — 1,52; б — 1,56; светлота поверхности древесины: 1 — 0 %; 2 — 1 %; 3 — 1,5 %; область покрытий: ВГ — высокоглянцевые; ГЛ — глянцевые

**Fig. 4.** The dependence of the directionally reflected light flux of the controlled surface on the roughness of the coating at an angle of incidence — light reflection of 20°: the refractive index of the coating: а — 1,52; б — 1,56; lightness of wood surface: 1 — 0 %; 2 — 1 %; 3 — 1,5 %; coating area: ВГ — high gloss; ГЛ — sleek

матовые были обоснованы и подробно разобраны в статьях [14, 15].

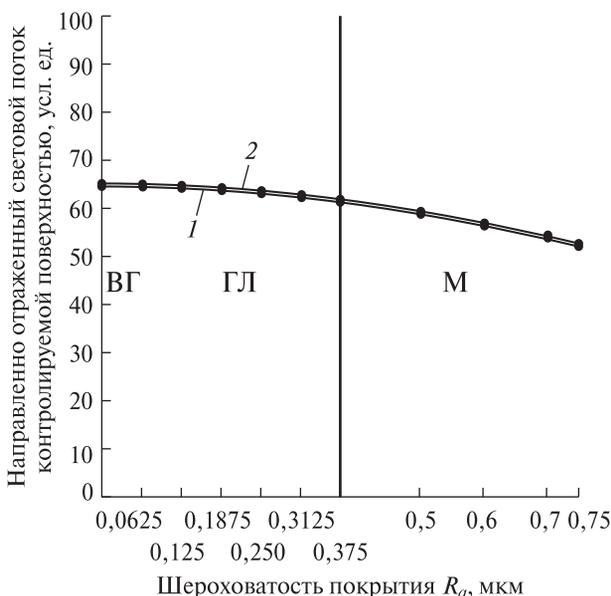
Используя уравнения (7) — (12), можно оценить влияние светлоты древесины в общем отраженном световом потоке контролируемой поверхности. На рис. 7 приведены графики зависимостей направленно отраженного светового потока подложкой (древесиной) в общем отраженном световом потоке контролируемой поверхностью от шероховатости покрытия. Графики приведены для углов падения — отражения света 20° и 60°. Ранее было определено, что для этих углов падения — отражения света влияние светлоты подложки существенно, а для угла 85° малозначимо.

На рис. 7 видно, что с увеличением шероховатости покрытия снижается его отражательная характеристика и увеличивается влияние светового потока, отраженного древесиной (подложкой) в общем световом потоке, отраженном контролируемой поверхностью. Для угла падения — отражения света 20° такое влияние для высокоглянцевых покрытий составляет 17...28 %, для глянцевых — от 20 до 99 % при различной шероховатости покрытий. На матовых покрытиях такое влияние подложки находится в узких пределах — 99...100 %. Матовые покрытия ввиду значительной шероховатости поверхности обладают



**Рис. 5.** Зависимость направленно отраженного светового потока контролируемой поверхностью от шероховатости покрытия под углом падения — отражения света 60°: М — матовые покрытия; остальные условные обозначения те же, что и на рис. 4

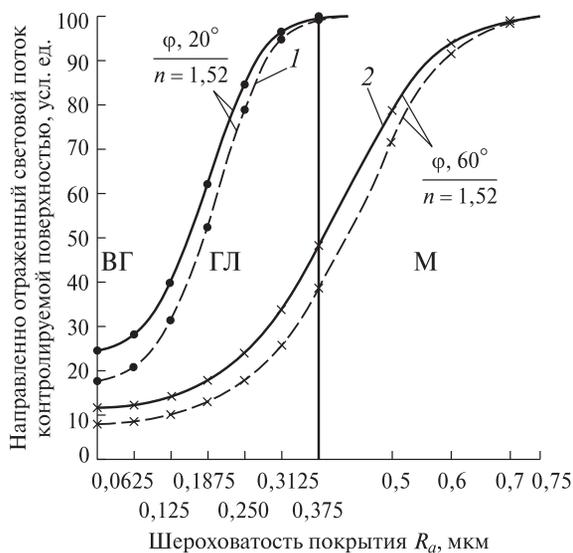
**Fig. 5.** The dependence of the directionally reflected light flux of the controlled surface on the roughness of the coating at an angle of incidence — light reflection of 60°: М — matte coatings; other are the same as in Fig. 4



**Рис. 6.** Зависимость направленно отраженного светового потока контролируемой поверхностью от шероховатости покрытия под углом падения — отражения света 85°. Условные обозначения см. рис. 4

**Fig. 6.** The dependence of the directionally reflected light flux of the controlled surface on the roughness of the coating at an angle of incidence — light reflection of 85°. Conventional symbols see Fig. 4

очень низкой отражательной способностью. Для них характерно, что в общем световом потоке, отраженном контролируемой поверхностью, в пределах от 90 до 99 % преобладает свет, отраженный древесной подложкой.



**Рис. 7.** Зависимость направленно отраженного светового потока подложкой в общем отраженном световом потоке контролируемой поверхностью от шероховатости покрытия: 1 —  $\rho = 1\%$ ; 2 —  $\rho = 1,5\%$ ; остальные условные обозначения те же, что и на рис. 4, 5

**Fig. 7.** The dependence of the directionally reflected light flux by the substrate in the total reflected light flux of the controlled surface on the roughness of the coating: 1 —  $\rho = 1\%$ ; 2 —  $\rho = 1,5\%$ ; other conventional symbols are the same as in Fig. 4, 5

Для угла падения — отражения света 60° влияние светлоты древесной подложки в световом потоке, отраженном контролируемой поверхностью, составит для высокоглянцевых покрытий 8...12, для глянцевых — 10...47, и матовых —

37...100 % при различной шероховатости поверхности покрытий.

Обращают на себя внимание графики (рис. 8) зависимостей направленно отраженного светового потока контролируемой поверхностью под углом падения — отражения света 5°. Выбор угла неслучаен, так как этот угол практически приближается к нормальному углу падения — отражения света, при котором возможна фиксация диффузно отраженного света от контролируемой поверхности покрытия с учетом светового потока, отраженного от подложки. Из сравнения кривых 3 и 4 при светлоте 0 %, следует, что изменения направленно отраженного светового потока при различной шероховатости покрытия незначительно различаются при различных значениях показателя преломления покрытий (1,52 и 1,56). Это характерно для высокоглянцевых и глянцевых покрытий, т. е. изменение показателя преломления высокоглянцевых и глянцевых покрытий от 1,52 до 1,56 при различной шероховатости увеличивает показания блескомеров приблизительно на 10 %. Для матовых покрытий такое изменение показаний блескомеров вследствие увеличения показателя преломления покрытий от 1,52 до 1,56 находится в пределах ошибки измерения.

Существенное влияние на показания блескомеров оказывает светлота поверхности подложки (древесины). При одинаковых значениях показателей преломления, например 1,52 или 1,56, но при различной светлоте подложки, например 0 и 1,0 % или 0 и 1,5 %, существенно изменяются значения направленно отраженного светового потока контролируемой поверхностью (см. рис. 4, 5).

Проведен сравнительный анализ значений блеска высокоглянцевых и глянцевых покрытий под углом падения — отражения света 20° и высокоглянцевых, глянцевых и матовых покрытий под углом падения — отражения света 60° при различных значениях шероховатости, показателей преломления покрытий и светлоты.

Ранее [16–20] была установлена зависимость коэффициента отражения света древесиной ( $\rho$ , %) от диффузного отражения контролируемой поверхности ( $D_0$ , усл. ед.) вида

$$\rho = D_0 / 57. \tag{13}$$

Диффузное отражение света  $D_0$  определяется блескомером с углом падения 45° и углом отражения 0° (см. рис. 2). Зная величину  $\rho$  (1 или 1,5 %) можно определить значение  $D_0$ . При  $\rho = 1$  %  $D_0$  составит 57 усл. ед., а при  $\rho = 1,5$  %  $D_0$  будет равно 85,5 усл. ед. Используя значения  $D_0$  при различной светлоте древесины, скорректируем блеск (Б) покрытий для углов падения — отражения света 20° и 60° по формулам

$$B_{20} = R_{20}^p - 0,2D_0, \tag{14}$$

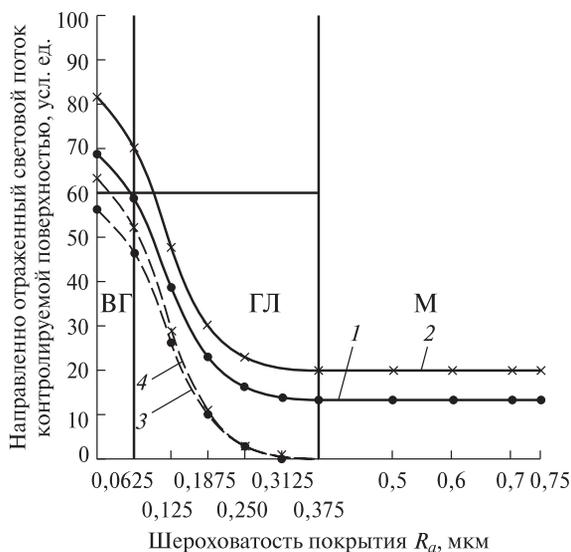


Рис. 8. Зависимость направленно отраженного светового потока контролируемой поверхностью от шероховатости покрытия под углом падения — отражения света 5°: 1 —  $n = 1,52$ ,  $\rho = 1,0$  %; 2 —  $n = 1,56$ ,  $\rho = 1,5$  %; 3 —  $n = 1,52$ ,  $\rho = 0$  %; 4 —  $n = 1,56$ ,  $\rho = 0$  %. Остальные условные обозначения см. рис. 4, 5

Fig. 8. The dependence of the directionally reflected light flux of the controlled surface on the roughness of the coating at an angle of incidence — light reflection of 5°: 1 —  $n = 1,52$ ,  $\rho = 1,0$  %; 2 —  $n = 1,56$ ,  $\rho = 1,5$  %; 3 —  $n = 1,52$ ,  $\rho = 0$  %; 4 —  $n = 1,56$ ,  $\rho = 0$  %. Other conventional symbols see Fig. 4, 5

$$B_{60} = R_{60}^p - 0,1D_0, \tag{15}$$

где  $R_{20}^p$  и  $R_{60}^p$  — направленно отраженный световой поток контролируемой поверхностью покрытия под углом падения — отражения света соответственно 20° и 60° при определенной светлоте поверхности древесины.

Значения блеска  $B_{20}$  и  $B_{60}$ , скорректированные на светлоту древесины, сравним со значениями направленно отраженного светового потока контролируемой поверхностью покрытия при светлоте древесины 0 %. Из табл. 1 следует, что для высокоглянцевых покрытий ( $R_a < 0,0625$  мкм) относительная ошибка составляет менее 5 %. Близкие к высокоглянцевым глянцевые покрытия ( $R_a < 0,125$  мкм) имеют относительную ошибку более 5 %, но менее 7,06 %. Более шероховатые покрытия имеют относительную ошибку более 10 %.

Отсюда блескомер с углом падения — отражения света 20° можно рекомендовать для аттестации по блеску с коррекцией показаний на светлоту древесины для высокоглянцевых покрытий.

Аналогичны расчеты (табл. 2) для угла падения — отражения света 60°. Блескомер с таким его значением можно использовать для аттестации по блеску высокоглянцевых ( $R_a < 0,0625$  мкм) и глянцевых ( $0,0625 < R_a < 0,375$  мкм) покрытий.

Т а б л и ц а 1

**Величина блеска высокоглянцевых и глянцевых покрытий под углом падения — отражения света 20° при различных значениях шероховатости, показателя преломления покрытий и светлоты поверхности древесины**  
**The gloss value of high-gloss and glossy coatings at an angle of incidence— light reflection of 20 ° at various values of roughness, refractive index of coatings and lightness of the wood surface**

Шероховатость поверхности покрытия $R_a$ , мкм	Показатель преломления покрытия	Направленно отраженный световой поток контролируемой поверхностью покрытия под углом 20° ( $R_{20}^p$ ) (усл. ед.) при светлоте поверхности древесины $\rho$ , %			Блеск покрытия $B_{20} = R_{20}^p - 0,2D_0$ , (усл. ед.), скорректированный на светлоту поверхности древесины для $\rho$ , %		Относительная ошибка $\Delta = \frac{R_{20}^o - B_{20}}{R_{20}^o} \cdot 100\%$ при светлоте поверхности древесины $\rho$ , %	
		0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0	1,5
0	1,52	59,8	68,53	74,65	57,13	57,55	+4,46	+3,76
	1,56	62,74	76,30	82,31	64,90	65,21	-3,44	-3,93
0,0625	1,52	47,39	59,74	65,92	48,34	48,82	-2,0	-3,01
	1,56	54,05	66,27	72,39	54,87	55,29	-1,51	-2,29
0,125	1,52	28,17	40,89	47,26	29,49	30,16	-4,68	-7,06
	1,56	32,13	44,78	51,10	33,38	34,0	-3,89	-5,82
0,1875	1,52	11,88	24,92	31,44	13,52	14,34	-13,8	-20,7
	1,56	13,56	26,57	33,07	15,17	15,97	-11,87	-17,7
0,25	1,52	3,55	13,99	23,36	2,59	6,26	+27,04	-76,3
	1,56	4,04	17,23	23,83	5,83	6,73	-44,3	-65,5

Т а б л и ц а 2

**Величина блеска высокоглянцевых, глянцевых и матовых покрытий под углом падения — отражения света 60° при различных значениях шероховатости, показателе преломления покрытий и светлоты поверхности древесины**  
**The gloss value of high-gloss, sleek and matte coatings at an incidence angle of 60 ° light reflection at various roughness values, refractive index of coatings and lightness of wood surface**

Шероховатость поверхности покрытия $R_a$ , мкм	Показатель преломления покрытия	Направленно отраженный световой поток контролируемой поверхностью покрытия под углом 60° ( $R_{60}^p$ ) (усл. ед.) при светлоте поверхности древесины $\rho$ , %			Блеск покрытия $B_{60} = R_{60}^p - 0,1D_0$ , (усл. ед.), скорректированный на светлоту поверхности древесины для $\rho$ , %		Относительная ошибка $\Delta = \frac{R_{60}^o - B_{60}}{R_{60}^o} \cdot 100\%$ при светлоте поверхности древесины $\rho$ , %	
		0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0	1,5
0	1,52	59,8	65,5	68,7	59,8	60,15	0	-0,58
	1,56	63,7	69,57	72,21	63,87	63,66	-0,26	+0,06
0,0625	1,52	57,26	62,77	65,52	57,07	56,97	+0,33	+0,50
	1,56	61,19	66,52	69,19	60,82	60,64	+0,60	+0,89
0,125	1,52	49,44	54,98	57,75	49,28	49,20	+0,32	+0,48
	1,56	52,83	58,31	61,05	52,61	52,50	+0,41	+0,62
0,1875	1,52	38,73	44,47	47,34	38,77	38,79	-0,10	-0,15
	1,56	41,39	47,08	49,93	41,38	41,38	+0,02	+0,02
0,25	1,52	27,54	33,48	36,47	27,78	27,92	-0,87	-1,37
	1,56	29,44	35,36	38,32	29,66	29,77	-0,74	-1,12
0,3125	1,52	17,74	23,88	26,95	18,18	18,40	-2,48	-3,72
	1,56	18,96	25,08	28,14	19,38	19,59	-2,21	-3,32
0,375	1,52	10,28	16,56	19,71	10,86	11,16	-5,64	-8,56
	1,56	10,99	17,26	20,40	11,56	11,85	-5,18	-7,82
0,5	1,52	2,58	9,01	12,23	3,31	3,68	-28,29	-42,63
	1,56	2,76	9,19	12,41	3,49	3,86	-26,44	-39,85
0,6	1,52	0,6	7,07	10,31	1,37	1,76	-128,3	-193,3
	1,56	0,64	7,11	10,35	1,41	1,8	-120,3	-181,25

На матовых покрытиях ( $R_a > 0,375$  мкм) относительная ошибка составляет более 28 %, что говорит о нецелесообразности использования его для аттестации по блеску этих покрытий.

Для матовых покрытий предлагается использовать блескомер с углом падения — отражения света  $85^\circ$ . Прямые измерения блеска на матовых покрытиях с помощью блескомера на угол  $85^\circ$  не требуют коррекции его показаний на светлоту древесины (см. рис. 6).

## Выводы

Ранее выполненные работы, относящиеся к разработке методов определения блеска прозрачных лаковых покрытий на древесине и древесных материалах и предлагаемые в настоящее время в отечественной и зарубежной практике приборы и методы для этой цели, позволяют предлагать необходимость пересмотра государственного стандарта ГОСТ 16143–81. Для пересмотра следует использовать методики определения блеска покрытий в гармонизации с известными методами из мировой практики.

Блескомеры с углами падения — отражения света  $20^\circ$ ,  $60^\circ$  и  $85^\circ$  можно использовать для определения блеска различного вида покрытий из разряда высокоглянцевых, глянцевых и матовых.

Важно учитывать особенности определения блеска покрытий, сформированных на древесине и древесном материале. Блескомеры с углом падения — отражения света  $20^\circ$  и  $60^\circ$  будут фиксировать на фотоприемнике не только лучи света, отраженные поверхностью покрытия, но и свет, прошедший толщину прозрачной лаковой пленки и отраженный поверхностью древесины. Чем светлее древесина, тем больше вносимый световой поток, отраженный от ее поверхности, при прочих равных условиях состояния контролируемых покрытий. Отсюда возникает необходимость корректирования показаний блескомеров на светлоту древесины.

## Список литературы

- [1] Рыбин Б.М. Разработка метода контроля степени матовости прозрачных лаковых покрытий // Науч. тр. МЛТИ, 1980. Вып. 124. С. 107–111.
- [2] Буглай Б.М., Рыбин Б.М. О методах оценки блеска матированных покрытий // Деревообрабатывающая промышленность, 1981. № 10. С. 2–5.
- [3] Рыбин Б.М. Исследование возможностей применения щуповых методов для оценки матовых покрытий // Науч. тр. МЛТИ, 1980. Вып. 117. С. 57–61.
- [4] Буглай Б.М., Рыбин Б.М. Древесина. Метод определения степени матовости прозрачных лаковых покрытий. РТМ. М.: ВПКТИМ, 1981. 18 с.
- [5] Буглай Б.М., Рыбин Б.М. Древесина. Метод определения степени матовости прозрачных лаковых покрытий. Методические рекомендации. М.: МЛТИ, 1983. 18 с.
- [6] Рыбин Б.М. Исследование влияния светлоты подложки на показания прибора ФБ-2 при оценке блеска зеркальных лаковых покрытий // Науч. тр. МЛТИ, 1981. Вып. 140. С. 39–42.
- [7] Рыбин Б.М. Исследование влияния светлоты подложки на показания фотоэлектрических блескомеров при оценке блеска прозрачных лаковых покрытий // Тез. докл. науч.-техн. конф.: «Перспективные материалы, конструкции и технологии в производстве мебели и строительных изделий». Стара Загора, Болгария, 1988. С. 25.
- [8] Онегин В.И. Свойства древесины, учитываемые при формировании защитно-декоративных покрытий древесины и древесных материалов // Изв. высших учеб. заведений. Лесной журнал, 2015. № 6 (348). С. 116–127.
- [9] Топорец А.С. Фотометрический метод определения средней высоты микронеровностей шероховатой поверхности // Оптико-механическая промышленность, 1969. № 6. С. 60–64.
- [10] Рыбин Б.М. Совершенствование технологических процессов формирования прозрачных матовых покрытий на древесине: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.05. Москва, 1998. 46 с.
- [11] Рыбин Б.М., Жуков Е.В. Методические указания на метод определения показателя преломления прозрачных лаковых покрытий для древесины. М.: МЛТИ, 1984. 16 с.
- [12] Рыбин Б.М., Жуков Е.В. Метод определения показателя преломления прозрачных лаковых покрытий // Деревообрабатывающая промышленность, 1984. № 7. С. 9–10.
- [13] Рыбин Б.М. Технология и оборудование защитно-декоративных покрытий древесины и древесных материалов. М.: МГУЛ, 2003. 568 с.
- [14] Мелешко А.В., Романова С.С. Влияние шероховатости поверхности изделий из хвойной древесины на блеск лакокрасочных покрытий // Актуальные проблемы лесного комплекса, 2007. № 20. С. 121–123.
- [15] Онегин В.И. Свойства древесины, учитываемые при формировании защитно-декоративных покрытий древесины и древесных материалов // Изв. высших учеб. заведений. Лесной журнал, 2015. № 6 (348). С. 116–127.
- [16] Рыбин Б.М. Оценка блеска прозрачных лаковых покрытий // Изв. высших учеб. заведений. Лесной журнал, 1990. № 6. С. 53–58.
- [17] Завражнова И.А. Метод оценки блеска защитно-декоративных покрытий на древесине и древесных подложках // Науч. тр. МГУЛ, 2010. Вып. 349. С. 55–62.
- [18] Рыбин Б.М. Об оценке блеска поверхностей ламинированных древесностружечных плит // Науч. тр. МЛТИ, 1984. Вып. 161. С. 82–84.
- [19] Рыбин Б.М., Завражнова И.А. К вопросу оценки блеска прозрачных лаковых покрытий на древесине // Тез. докл. конф., посвященной 50-летию Факультета технологии деревообработки ВГЛТА «Современные технологические процессы получения материалов и изделий из древесины», Воронеж, 17–21 мая 2010 г. Воронеж: ВГЛТА, 2010. С. 98–108.
- [20] Завражнова И.А. Метод оценки и разработка нормативов блеска защитно-декоративных покрытий на древесине и древесных материалах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.05. Москва, 2016. 21 с.

## Сведения об авторах

**Рыбин Борис Матвеевич** — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), rybin@mgul.ac.ru

**Завражнова Ирина Анатольевна** — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), zavrazhnova@mgul.ac.ru

**Рыбин Дмитрий Борисович** — технолог ООО «Тимберланд», wood@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.01.2020.

Принята к публикации 17.02.2020.

## METHOD STANDARDIZATION FOR DETERMINING GLOSS OF TRANSPARENT LAQUERED COATINGS ON WOOD AND WOOD MATERIALS

**B.M. Rybin<sup>1</sup>, I.A. Zavrazhnova<sup>1</sup>, D.B. Rybin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

<sup>2</sup>Timberland LLC, 10, Severnaya St., 141805, Dmitrovsky District, working village Nekrasovsky, Moscow reg., Russia

rybin@mgul.ac.ru

As the basis for the state standard to determine the gloss of high-gloss, sleek and matte coatings the ISO 2813: 2014 standard was used. It provides for the use of gloss meters with different incidence-reflection angles of 20°, 60° and 85°. It is known that when determining the gloss of coatings on a wood substrate, it is necessary to correct the readings of the gloss meters on the lightness of wood. This is due to the fact that not only light rays reflected by the surface of the controlled coating, but also rays transmitted through the transparent coating and reflected by the wood substrate, fall on the photodetector. The greater the lightness of the surface of the wood, the higher the readings of the glossmeter, all other things being equal, the condition of the surfaces of the controlled coatings. In order to measure the influence of lightness of the wood surface, it is proposed to use a glossmeter with an incidence-reflection angle of light of 45° in the standard being developed. Using it, it will be possible to determine the diffuse component of the reflected light from the surface of the wood and to correct the readings of the gloss meters on it. For a glossmeter with an incidence-reflection angle of light of 20°, used to determine the gloss of high-gloss coatings, such a correction of the readings will be 20 % of the diffuse component. For the 60° gloss meter used to determine the gloss of glossy coatings, the readings will be corrected to 10 % of the diffuse component. A gloss meter at an angle of 85° is proposed for assessing the gloss of matte coatings. Its readings are not corrected for the lightness of wood, because at this angle of incidence-reflection of light, the magnitude of the diffuse component from wood is negligible. The unification of the methods for determining the gloss of transparent coatings, the use of equivalent gloss meters, as well as the detailed study of factors affecting the accuracy of instrumentation assessment, makes the proposed state standard competitive in both domestic and foreign practice for assessing the quality of coatings by the gloss of surfaces on parts, assemblies and wood products and wood materials.

**Keywords:** gloss of coating, lightness of wood, standardization of the method

**Suggested citation:** Rybin B.M., Zavrazhnova I.A., Rybin D.B. *K voprosu standartizatsii metoda opredeleniya bleska prozrachnykh lakovykh pokrytiy na drevesine i drevesnykh materialakh* [Method standardization for determining gloss of transparent laquered coatings on wood and wood materials]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 2, pp. 57–67. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-57-67

## References

- [1] Rybin B.M. *Razrabotka metoda kontrolya stepeni matovosti prozrachnykh lakovykh pokrytiy* [Development of a method for controlling the degree of haze of transparent varnish coatings] *Nauchn. tr. MLTI [Scientific works of MLTI]*, 1980, iss. 124, pp. 107–111.
- [2] Buglay B.M., Rybin B.M. *O metodakh otsenki bleska matirovannykh pokrytiy* [On methods for assessing the gloss of matte coatings] *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost' [Woodworking industry]*, 1981, no. 10, pp. 2–5.
- [3] Rybin B.M. *Issledovanie vozmozhnostey primeneniya shchupovykh metodov dlya otsenki matovykh pokrytiy* [Study of the possibilities of using stylus methods to assess matte coatings] *Nauchn. tr. MLTI [Scientific works of MLTI]*, 1980, iss. 117, pp. 57–61.
- [4] Buglay B.M., Rybin B.M. *Drevesina. Metod opredeleniya stepeni matovosti prozrachnykh lakovykh pokrytiy. RTM* [Wood. Method for determining the degree of haze of transparent varnish coatings. RTM]. Moscow: VPKTIM, 1981, 18 p.
- [5] Buglay B.M., Rybin B.M. *Drevesina. Metod opredeleniya stepeni matovosti prozrachnykh lakovykh pokrytiy. Metodicheskie rekomendatsii* [Wood. Method for determining the degree of haze of transparent varnish coatings. Guidelines]. Moscow: MLTI, 1983, 18 p.

- [6] Rybin B.M. *Issledovanie vliyaniya svetloty podlozhki na pokazaniya pribora FB-2 pri otsenke bleska zerkal'nykh lakovykh pokrytiy* [Investigation of the influence of the substrate lightness on the readings of the FB-2 device when evaluating the gloss of mirror varnish coatings] Nauchn. tr. MLTI [Scientific works of MLTI], 1981, iss. 140, pp. 39–42.
- [7] Rybin B.M. *Issledovanie vliyaniya svetloty podlozhki na pokazaniya fotoelektricheskikh bleskomerov pri otsenke bleska prozrachnykh lakovykh pokrytiy* [Investigation of the influence of the substrate lightness on the readings of photoelectric gloss meters in assessing the gloss of transparent varnish coatings] Tezisy докладov nauchn.-tekhn. konferentsii: «Perspektivnyye materialy, konstruksii i tekhnologii v proizvodstve mebeli i stroitel'nykh izdeliy» [Abstracts of scientific and technical reports. Conference: «Promising materials, structures and technologies in the manufacture of furniture and building and construction products»]. Stara Zagora, Bulgaria, 1988, p. 25.
- [8] Onegin V.I. *Svoystva drevesiny, uchityvaemye pri formirovani zashchitno-dekorativnykh pokrytiy drevesiny i drevesnykh materialov* [Properties of wood, taken into account when forming protective and decorative coatings of wood and wood materials]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal [News of higher educational institutions. Forest Journal], 2015, no. 6 (348), pp. 116–127.
- [9] Toporets A.S. *Fotometricheskyy metod opredeleniya sredney vysoty mikronerovnostey sherokhovatoy poverkhnosti* [Photometric method for determining the average height of microroughnesses of a rough surface]. Optikomekhanicheskaya promyshlennost' [Optomechanical Industry], 1969, no. 6, pp. 60–64.
- [10] Rybin B.M. *Sovershenstvovanie tekhnologicheskikh protsessov formirovaniya prozrachnykh matovykh pokrytiy na drevesine* [Improvement of technological processes for the formation of transparent matte coatings on wood]. Abstract. Dis. ... Dr. Sci. (Tech.). 05.21.05. Moscow, 1998, 46 p.
- [11] Rybin B.M., Zhukov E.V. *Metodicheskie ukazaniya na metod opredeleniya pokazatelya prelomleniya prozrachnykh lakovykh pokrytiy dlya drevesiny* [Guidelines for the method of determining the refractive index of transparent lacquer coatings for wood]. Moscow: MLTI, 1984, 16 p.
- [12] Rybin B.M., Zhukov E.V. *Metod opredeleniya pokazatelya prelomleniya prozrachnykh lakovykh pokrytiy* [The method of determining the refractive index of transparent varnish coatings]. Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost' [Woodworking industry], 1984, no. 7, pp. 9–10.
- [13] Rybin B.M. *Tekhnologiya i oborudovanie zashchitno-dekorativnykh pokrytiy drevesiny i drevesnykh materialov* [Technology and equipment of protective and decorative coatings of wood and wood materials]. Moscow: MGUL, 2003, 568 p.
- [14] Meleshko A.V., Romanova S.S. *Vliyaniye sherokhovatosti poverkhnosti izdeliy iz khvoynoy drevesiny na blesk lakokrasochnykh pokrytiy* [The effect of surface roughness of coniferous wood products on the luster of coatings] Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa [Actual problems of the forest complex], 2007, no. 20, pp. 121–123.
- [15] Onegin V.I. *Svoystva drevesiny, uchityvaemye pri formirovani zashchitno-dekorativnykh pokrytiy drevesiny i drevesnykh materialov* [Properties of wood, taken into account when forming protective and decorative coatings of wood and wood materials] Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal [News of higher educational institutions. Forest Journal], 2015, no. 6 (348), pp. 116–127.
- [16] Rybin B.M. *Otsenka bleska prozrachnykh lakovykh pokrytiy* [Gloss estimation of transparent varnish coatings] Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal [News of higher educational institutions. Forest Journal], 1990, no. 6, pp. 53–58.
- [17] Zavrazhnova I.A. *Metod otsenki bleska zashchitno-dekorativnykh pokrytiy na drevesine i drevesnykh podlozhkakh* [Method for assessing the gloss of protective and decorative coatings on wood and wood substrates] Nauchn. tr. MSFU [Scientific works of MSFU], 2010, iss. 349, pp. 55–62.
- [18] Rybin B.M. *Ob otsenke bleska poverkhnostey laminirovannykh drevesnostruzhechnykh plit* [About the gloss of surfaces of laminated chipboards] Nauchn. tr. MLTI [Scientific works of MLTI], 1984, no. 161, pp. 82–84.
- [19] Rybin B.M., Zavrazhnova I.A. *K voprosu otsenki bleska prozrachnykh lakovykh pokrytiy na drevesine* [On the issue of assessing the gloss of transparent varnish coatings on wood]. Tezisy konferentsii, posvyashchennoy 50-letiyu fakul'teta tekhnologii derevoobrabotki VGLTA «Sovremennyye tekhnologicheskie protsessy polucheniya materialov i izdeliy iz drevesiny» [Abstracts of the conference dedicated to the 50th anniversary of the VGLTA Faculty of Woodworking Technology «Modern Technological Processes for the Production of Wood Materials and Products»], Voronezh, May 17–21, 2010. Voronezh: VGLTA, 2010, pp. 98–108.
- [20] Zavrazhnova I.A. *Metod otsenki i razrabotka normativov bleska zashchitno-dekorativnykh pokrytiy na drevesine i drevesnykh materialakh* [Method of assessment and development of gloss standards for protective and decorative coatings on wood and wood materials]. Abstract. Dis. ... Sci. (Tech.). 05.21.05. Moscow, 2016, 21 p.

## Author's information

**Rybin Boris Matveevich** — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), rybin@mgul.ac.ru

**Zavrazhnova Irina Anatolievna** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), zavrazhnova@mgul.ac.ru

**Rybin Dmitry Borisovich** — Technologist of Timberland LLC, wood@yandex.ru

Received 20.01.2020.

Accepted for publication 17.02.2020.

## К ВОПРОСУ ПРОИЗВОДСТВА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ДРЕВЕСИНЫ ДИСКОВЫМИ РУБИТЕЛЬНЫМИ МАШИНАМИ С РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ ВЫБРОСА ЩЕПЫ

С.В. Фокин<sup>1</sup>, О.А. Фомина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова, 410012, г. Саратов, Театральная пл., д. 1

<sup>2</sup>Государственный аграрный университет Северного Зауралья, Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Республики, д. 7

feht@mail.ru

Проанализированы новые технические решения, повышающие эффективность процесса выброса щепы из дисковых рубительных машинах, путем совершенствования конструктивно-технологических параметров элементов, участвующих в рабочем процессе эвакуации измельченной древесины. Рассмотрены различные конструкции дисковых рубительных машин, отличительной особенностью которых служит тип механизма выброса щепы. Анализ теоретических исследований в области изучения рабочего процесса эвакуации щепы из рубительной машины показал, что на него влияют конструкция диска, ширина и диаметр кожуха, размер и конструкция щепопровода, количество и размер вентиляционных лопаток. В соответствии с данными исследованиями, авторами предлагаются различные технические решения по изменению конструкции щепопровода для обеспечения эффективного транспортирования щепы. Для получения качественной щепы наибольшее практическое использование получили дисковые рубительные машины с верхним выбросом щепы, так как они являются наиболее удобным видом оборудования в условиях лесосеки. Конструктивные усовершенствования дисковых рубительных машин с верхним выбросом щепы необходимо проводить в направлении совершенствования конструктивно-технологических параметров рабочего процесса выброса щепы путем создания восходящих потоков воздуха в кожухе рубительного диска с возможностью механического доизмельчения щепы.

**Ключевые слова:** топливная щепка, теплотворная способность, рубительные машины, механизм выброса щепы

**Ссылка для цитирования:** Фокин С.В., Фомина О.А. К вопросу производства энергетической дисковыми рубительными машинами с различными способами выброса щепы // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 2. С. 68–73. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-68-73

В настоящее время при проведении сплошных рубок после механизированной заготовки древесины на лесосеках остается значительное количество древесной биомассы. Под древесной биомассой понимают остатки деревьев (сучья, ветви, вершины, куски стволовой древесины, пни, корни), образующиеся в процессе заготовки древесины на лесосеке и утратившие частично или полностью потребительскую стоимость исходного сырья. Перевозить такой материал для переработки невыгодно, а вот получать из него щепу непосредственно на лесосеке может быть экономически целесообразно. Поэтому производство на лесосеке топливной щепы позволяет энергетическим предприятиям не только расширить сырьевую базу, но и отказаться от дорогостоящих, энергоемких участков первичного измельчения, сократить площади хранения сырья. Предлагаемое современное оборудование для производства щепы весьма разнообразно и подбирается для решения конкретных производственных задач при изготовлении: плитных и строительных материалов, подстилающего материала для скота и птицы, кормовых добавок, материала для декорирования садов и устройства садовых дорожек, энергетической древесины. Производство энергетической древесины предусматривает применение стационарных и

мобильных рубительных машин. При этом наиболее широкое применение получили мобильные дисковые рубительные машины, так как их можно легко перевезти к месту нахождения сырья и они не требуют дополнительных работ по обеспечению рабочего процесса переработки отходов лесосечных работ (возведения фундамента, прокладывания энергетических коммуникаций). Данный тип рабочего оборудования легко агрегируется с тракторами общего назначения или же имеет свой независимый привод.

В настоящее время особую актуальность приобрела проблема использования древесных отходов в качестве топлива. Такие отходы образуются на лесосеках и представляют собой элементы кроны в количестве от 30 до 50 % относительно всего объема заготавливаемой древесины [1].

В развитых странах Европы отходы лесосечных работ используются для производства топливной щепы, брикетов, пеллетов, но в России проблема переработки древесных отходов для энергетических целей остается нерешенной. Как показывает практика, основная масса древесных остатков не находит технологического применения и остается на вырубках в виде валов или куч, так как лесозаготовка осуществляется сортиментным способом, поэтому с лесосеки вывозится только деловая древесина.

Исследования показали, что в России ежегодно вырубается 130 млн м<sup>3</sup> древесины, и данный показатель может быть увеличен до 550 млн м<sup>3</sup>. При этом древесные отходы составляют до 40 % или 370 млн м<sup>3</sup> предположительно с содержанием энергии до  $2,29 \times 10^{18}$  Дж [2]. Очевидным преимуществом древесной биомассы является то, что она практически не содержит серы — максимальное содержание серы в древесине составляет 0,05 %. Выбросы углекислого газа, образующиеся при сжигании любого биотоплива, минимальны. Поэтому древесина относится к CO<sub>2</sub>-нейтральным видам энергоресурсов и не считается загрязнителем атмосферы [3]. Анализ теплотворной способности самых распространенных видов топлива, которые используются в РФ, показал, что удельная теплота сгорания у продуктов нефтепереработки в среднем выше, чем у ископаемого твердого топлива, а теплотворность топлива из древесных отходов имеет схожие показатели с ископаемым [4].

Измельчение отходов древесины является основным этапом производства топливной древесной продукции. В настоящее время на предприятиях для измельчения древесных отходов в топливную щепу применяют рубительные машины различных конструкций [5]. Поскольку удаление щепы является конечным этапом производства энергетической древесины, который определяет качество и объем полученной продукции, то необходимо подробное рассмотрение существующих конструктивных схем выброса щепы из рубительных машин в целях совершенствования данной технологической операции [6, 7]. Для получения качественной щепы наибольшее практическое применение получили дисковые рубительные машины с верхним выбросом щепы, так как они являются наиболее удобным видом оборудования в условиях лесосеки. Благодаря тому, что для данного типа машин не требуется собственный двигатель, они компактны и применяются в любых местах заготовки древесины в пределах проходимости трактора [8].

## Цель работы

Целью работы является поиск новых технических решений, повышающих эффективность процесса выброса щепы из дисковых рубительных машин, путем совершенствования конструктивно-технологических параметров элементов, которые участвуют в рабочем процессе эвакуации измельченной древесины.

## Материалы и методы

Объектом исследования являются конструкции дисковых рубительных машин, отличительной особенностью которых служит тип меха-

низма выброса щепы. Анализ конструктивных особенностей рассматриваемого оборудования проводился на основе сравнительной характеристики качественных и количественных показателей производства энергетического материала.

## Результаты и обсуждение

Фракционный состав древесной щепы, предназначенной для энергетического использования, практически не нормируется, и на сжигание поступает щепа от рубительных машин без предварительной сортировки, а для практического использования топливной щепы содержание в топливе частиц длиной, свыше 100 мм и шириной менее 5 мм в количестве более 30 % нежелательно. Поэтому для наиболее эффективного сжигания дробленые древесные отходы доизмельчают для получения биомассы с равновеликими частицами [9]. Некоторые ученые проводили исследования конструкций оборудования и рабочего процесса эвакуации щепы из рубительной машины. Их исследования показали, что на процесс удаления щепы из кожуха рубительной машины влияют конструкция диска, ширина и диаметр кожуха, размер и конструкция щепопровода, количество и размер вентиляционных лопаток.

Применяемые на практике рубительные машины классифицируют следующим образом: по типу рабочего органа, мобильности, способам загрузки древесного сырья и удаления щепы из машины [10, 11]. По способам удаления щепы рубительные машины подразделяются на имеющие верхний, нижний и горизонтальный выбросы [12].

При верхнем выбросе щепу с помощью лопаток направляют по щепопроводу в бункер или контейнер, при нижнем — щепа под влиянием силы тяжести попадает на расположенный под машиной транспортер или бункер и направляется на дальнейшую переработку. При горизонтальном способе выброса щепы ее удаление происходит с помощью рубительного диска с ножами по направлению подачи сырья в машину.

Машины с верхним выбросом конструктивно проще, экономичнее и легче komponуются со смежным сортирующим оборудованием [13], в них при дроблении отпадают не полностью отделившиеся в процессе щепообразования волокна, а качество щепы после сортирования меньше подвержено изменениям при хранении и последующей транспортировке. Помимо прочего, дисковые рубительные машины с верхним выбросом щепы — самый удобный вид оборудования в условиях лесосеки вследствие того, что для них не требуется собственный двигатель, они компактны, а следовательно, могут использоваться в любых местах в пределах проходимости трактора [14, 15].

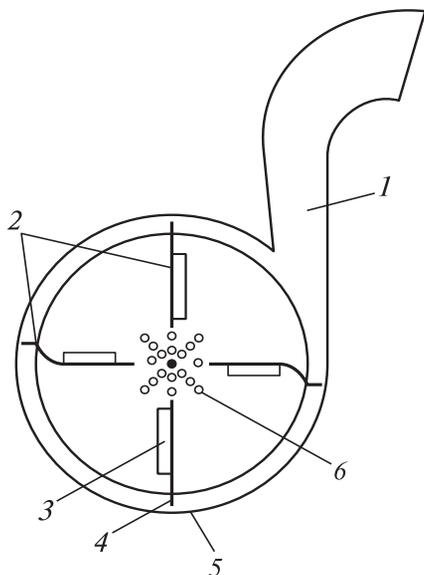


Схема механизма выброса щепы: 1 — щепопровод, 2 — лопатки, 3 — ребра, 4 — выступы прямоугольной формы, 5 — кожух измельчителя, 6 — отверстия в кожухе  
 Scheme of the chip ejection mechanism: 1 — chips, 2 — blades, 3 — ribs, 4 — rectangular protrusions, 5 — chopper casing, 6 — holes in the cover

Недостатком рубительных машин с верхним выбросом является значительное снижение качества щепы в виду ее ударов о кожух ножевого диска при ее выходе из-под ножей, а также интенсивный износ стенки кожуха. И то и другое обусловлено тем, что щепка, отделенная ножом от бревна с большой силой и значительной скоростью, ударяется о стенку кожуха и только затем подхватывается лопатками [16, 17].

Применение машин с нижним выбросом предпочтительно при выработке высококачественных видов щепы для производства целлюлозы, где особенно нежелательно ее повреждение. Основным недостатком рубительных машин с нижним выбросом является то, что сбор щепы, получаемой на этих машинах затруднен, вследствие расположения выходного окна щепопровода, поэтому данную конструктивную схему выброса щепы целесообразно применять в стационарных рубительных машинах.

Использование в конструкции рубительных машин горизонтального выброса щепы позволяет на 5–6 % увеличить выход частиц кондиционной фракции, так как при измельчении древесины происходит удар щепы о стенку кожуха машины, что при высокой скорости резания вызывает расслоение щепы, а результате возрастает доля мелкой фракции.

Проанализировав различные технические решения механизмов выброса щепы из рубительных машин, можно сделать вывод о том, что наибольшее распространение при производстве

топливной щепы получили мобильные дисковые рубительные машины с верхним выбросом щепы. Также следует учитывать, что при их конструктивном совершенствовании необходимо решать вопросы предохранения щепы от повреждений при ее эвакуации путем снижения ударной нагрузки щепы о заднюю стенку кожуха [18].

Данную проблему некоторые ученые [18, 19] предлагали решать с помощью изменения конструкции кожуха ножевого диска посредством ее изготовления выпуклой формы в зоне выхода потока щепы из подножевого отверстия. По мнению автора, такое выполнение задней стенки кожуха позволит изменить траекторию полета (косого удара) щепы и подачу сфокусированного потока на лопатку с последующим безударным выходом в патрубок трубопровода. Предлагалось заднюю стенку кожуха выполнить наклонно к торцевой плоскости ножевого диска под углом 15...30 град. и покрыть ее изнутри упругим покрытием с износостойким материалом, позволяющим снизить энергию удара щепы с задней стенкой кожуха на 30 %.

Предлагалось устанавливать дополнительные устройства внутри кожуха в виде кольцеобразного механизма впрыска жидкости со свободно установленной на валу крыльчаткой, имеющей винтообразные лопасти. Задача впрыска жидкости в зону вылета щепы заключалась в том, чтобы распыляемые струи увеличивали сопротивление потоку щепы, снижая трение частиц щепы при ударах о стенки кожуха и частиц щепы одну о другую.

Анализ теоретических исследований в области изучения рабочего процесса эвакуации щепы из рубительной машины показал, что на него влияют конструкция диска, ширина и диаметр кожуха, размер и конструкция щепопровода, количество и размер вентиляционных лопаток. В соответствии с этим авторы предлагают различные технические решения по изменению конструкции щепопровода для обеспечения эффективного транспортирования щепы, например сориентировать щепоотводящий патрубок так, чтобы снизилась энергия удара щепы о его конструктивные элементы. Установлено, что развиваемый диском и лопатками воздушный поток не способен обеспечить надежного транспортирования щепы из кожуха машины, поскольку создаваемый диском и лопатками поток воздуха способствует выбрасыванию только мелких частиц [20]. Следовательно, конструктивные усовершенствования дисковых рубительных машин с верхним выбросом щепы необходимо проводить в направлении совершенствования конструктивно-технологических параметров рабочего процесса выброса щепы, создавая восходящие потоки воздуха в кожухе рубительного диска с возможностью механического доизмельчения щепы. Для этого можно

использовать конструкцию механизма выброса щепы (рисунок).

Такая конструкция механизма выброса щепы имеет размещенные на поверхности лопаток ребра с выступами прямоугольной формы и отверстия в кожухе измельчающего диска, которые позволят создавать восходящие потоки воздуха, способные удалять полный объем щепы из рубительной машины.

## Выводы

1. Анализ теплотворной способности наиболее распространенных видов топлива показал, что удельная теплота сгорания продуктов нефтепереработки в среднем выше, чем ископаемого твердого топлива, а теплотворность топлива из древесных отходов имеет показатели, аналогичные ископаемому.

2. Для получения качественной щепы можно рекомендовать дисковые рубительные машины с верхним выбросом щепы, так как это наиболее подходящее оборудование для условий лесосеки.

3. На рабочий процесс эвакуации щепы из дисковых рубительных машин влияют конструкция диска, ширина и диаметр кожуха, размер и конструкция щепопровода, количество и размер вентиляционных лопаток.

4. Конструктивные усовершенствования дисковых рубительных машин с верхним выбросом щепы необходимо проводить в направлении совершенствования конструктивно-технологических параметров рабочего процесса выброса щепы путем создания восходящих потоков воздуха в кожухе рубительного диска с возможностью механического доизмельчения щепы.

## Список литературы

- [1] Алешина А.С. Газификация растительной биомассы в газогенераторах кипящего слоя: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04. СПб.: СПбГПУ, 2013. 21 с.
- [2] Pobedinsky V.V., Gazizov A.M., Sannikov S.P., Pobedinskiy A.A. Dielectric Permeability of Forestry Depending on Environmental Parameters in Radio Frequency Monitoring // *Mordovia University Bulletin*, 2018, no. 28(2), pp. 148–163.
- [3] Астафуров А.О. Управление замещением традиционной углеводородной энергетики эколого-ориентированной биоэнергетикой: автореф. дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05. М.: Государственный университет управления, 2012. 28 с.
- [4] Фокин С.В., Фомина О.А. Об основных видах энергетической древесины // *Forest Engineering* / ред. И.И. Слепцов. Якутск: Якутская ГСХА, 2018. С. 273–276.
- [5] Фокин С.В., Фомина О.А. Современное состояние лесного и лесоперерабатывающего комплекса Западной Сибири // Сборник статей II Всерос. (национальной) науч.-практ. конф. «Современные научно-практические решения в АПК», Тюмень, 26 октября 2018 г. Тюмень: Государственный аграрный университет Северного Зауралья, 2018. С. 149–152.
- [6] Фокин С.В., Фомина О.А. Способы транспортирования щепы из рубительных машин // *Науч. жизнь*, 2018, № 2. С. 10–15.
- [7] Фокин С.В., Фомина О.А. Об использовании математических методов моделирования рубительных машин // Материалы 17-й Междунар. молодежной науч.-практ. конф. «Фундаментальные исследования, методы и алгоритмы прикладной математики в технике, медицине и экономике» (Новочеркасск, 06–07 сентября, 2018). Новочеркасск: Лик, 2018. С. 158–159.
- [8] Линник В. Ю., Линник Ю. Н. Состояние и перспективы развития биоэнергетики // *Вестник университета*, 2019. № 10. С. 59–66. DOI 10/26425/1816-4277-2019-10-59-66
- [9] Фокин С.В., Шпортько О.Н. Основные экологические и лесотехнические требования, предъявляемые к рубительным машинам фрезерного типа для измельчения древесины // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*, 2015. Т. 3. № 2. С. 144–146.
- [10] Фокин С.В. Совершенствование технических средств переработки отходов лесосечных работ на топливную щепу в условиях вырубki. М: ИНФРА-М, 2018. 187 с.
- [11] Фокин С.В., Шпортько О.Н., Бурлаков А.С. Экологосберегающие технологии при ведении современных агролесомелиоративных мероприятий // *Науч. жизнь*, 2017. № 7. С. 77–90.
- [12] Алексеев А.Е., Думанский А.И., Думанский И.О. Выбор режимов лазерной термической обработки ножей рубительных машин для переработки сухостойной древесины // *ИВУЗ. Лесной журнал*, 2015. № 3 (345). С. 84–92.
- [13] Васильев С.Б., Шегельман И.Р. Формирование технологических процессов и обоснование параметров оборудования для производства технологической щепы. Петрозаводск: Карельская инженерная академия, 2000. 52 с.
- [14] Фокин С.В., Шпортько О.Н. Обоснование конструкции машин фрезерного типа для получения биотоплива в условиях лесов степной и лесостепной зон Поволжья // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*, 2014. Т. 5. № 3 (10). С. 156–160.
- [15] Сюнев В.С., Селиверстов А.А., Герасимов Ю.Ю., Соколов А.П. Лесосечные машины в фокусе биоэнергетики: конструкции, проектирование, расчет: учеб. пособие. Йоэнсуу: METLA, 2011. 143 с.
- [16] Головкин С.И., Коперин И.Ф., Найденов В.И. Энергетическое использование древесных отходов. М.: Лесн. пром-сть, 1987. 224 с.
- [17] Фокин С.В., Шпортько О.Н., Цыплаков В.В. Об использовании древесных отходов при восстановлении защитных лесных полос // *Науч. жизнь*, 2015, № 6. С. 134–142.
- [18] Фокин С.В., Фетяев А.Н. Технико-экономическое обоснование применения опытного образца рубительной машины // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*, 2015. Т. 3. № 5–3 (16-3). С. 201–204.
- [19] Цыгарова М.В. Использование передвижной рубительной машины для переработки порубочных остатков при заготовке древесины и рубках ухода // *Леса России в XXI веке: Материалы XI Междунар. науч.-техн. интернет-конф., посвященной 85-летию Лесоинженерного факультета СПбГЛТУ и 95-летию кафедры сухопутного транспорта леса*, Санкт-Петербург, 08–10 октября 2014 г. СПб.: СПбГЛТУ, 2014. С. 170–172
- [20] Колесникова А.В. Лесопользование на территории Сибири и Дальнего Востока: состояние и динамика // *Вестник Забайкальского государственного университета*, 2015. № 6 (121). С. 127–142.

## Сведения об авторах

**Фокин Сергей Владимирович** — д-р техн. наук, профессор кафедры лесного хозяйства и ландшафтного строительства Саратовского государственного аграрного университета, feht@mail.ru

**Фомина Ольга Александровна** — ст. преподаватель кафедры лесного хозяйства, деревообработки и прикладной механики государственного аграрного университета Северного Зауралья, os-stolbova@mail.ru

Поступила в редакцию 29.10.2019.

Принята к публикации 12.02.2020.

## ENERGY WOOD PRODUCTION BY DISK CHIPPERS WITH VARIOUS METHODS OF CHIP DISCHARGE

S.V. Fokin<sup>1</sup>, O.A. Fomina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Saratov State Agrarian University named after N.I. Babilov, 1, Theatre Sq., 410012, Saratov, Russia

<sup>2</sup>State Agrarian University of Northern Zauria, 7, Republic st., 625003, Tyumen, Russia

feht@mail.ru

The study gives the analysis of the new technical solutions that increase the process efficiency of chips discharge from disk chippers by improving the structural and technological parameters of the elements involved in the evacuation process of chopped wood. Various designs of disk chippers are considered, the distinctive feature of which is the type of chip discharge mechanism. An analysis of theoretical studies in the field of studying the process of chip discharge from a chipper showed that it is affected by the design of the disk, the width and diameter of the casing, the size and construction of the chip discharge tube, the number and size of ventilation blades. In accordance with these studies, the authors propose various technical solutions for changing the design of the chip discharge tube to ensure efficient transportation of chips. To obtain high-quality wood chips, disk chippers with an upper chip discharge have received the greatest practical use, since they are the most convenient type of equipment in the conditions of the cutting area. Structural improvements of disk chippers with an upper chip discharge must be carried out in the direction of improving the structural and technological parameters of the chip discharge workflow by creating ascending air flows in the chipper disk casing with the possibility of mechanical chip grinding.

**Keywords:** fuel chips, calorific value, chippers, chip discharge mechanism

**Suggested citation:** Fokin S.V., Fomina O.A. *K voprosu proizvodstva energeticheskoy drevesiny diskovymi rubitel'nyimi mashinami s razlichnymi sposobami vybrosa shchepy* [Energy wood production by disk chippers with various methods of chip discharge]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 2, pp. 68–73.

DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-68-73

## References

- [1] Aleshina A.S. *Gazifikatsiya rastitel'noy biomassy v gazogeneratorakh kipyashchego sloya* [Gasification of plant biomass in fluidized bed gas generators]. Abstract. Diss. Sci. (Tech.): 05.14.04. St. Petersburg: SNbSPU, 2013, 21 p.
- [2] Pobedinsky V.V., Gazizov A.M., Sannikov S.P., Pobedinskiy A.A. Dielectric Permeability of Forestry Depending on Environmental Parameters in Radio Frequency Monitoring. *Mordovia University Bulletin*, 2018, no. 28 (2), pp. 148–163.
- [3] Astafurov A.O. *Upravlenie zameshcheniem traditsionnoy uglevodородной energetiki ekologo-orientirovannoy bioenergetikoy* [Substitution management of traditional hydrocarbon energy with ecologically oriented bioenergy]. Abstract. Diss. Sci. (Econ.) 08.00.05. Moscow: State University of Management, 2012, 28 p.
- [4] Fokin S.V., Fomina O.A. *Ob osnovnykh vidakh energeticheskoy drevesiny* // *Forest Engineering*. Ed. Sleptsov I.I., Yakutsk, May 30–31, 2018, 2018. Yakutsk: Yakutsk State Agricultural Academy, 2018, pp. 273–276.
- [5] Fokin S.V., Fomina O.A. *Sovremennoe sostoyanie lesnogo i lesoperabatyvayushchego kompleksa Zapadnoy Sibiri* [The current state of the forest and forest processing complex in Western Siberia] *Sbornik statey II Vserossiyskoy (natsional'noy) nauchno-prakticheskoy konferentsii «Sovremennye nauchno-prakticheskie resheniya v APK»* [Collection of articles of the II All-Russian (national) scientific and practical conference «Modern scientific and practical solutions in the agricultural sector»], Tyumen, October 26, 2018. Tyumen: Northern Trans-Ural State Agricultural University, 2018, pp. 149–152.
- [6] Fokin S.V., Fomina O.A. *Sposoby transportirovaniya shchepy iz rubitel'nykh mashin* [Methods for transporting wood chips from chippers] *Nauchnaya zhizn'* [Scientific Life], 2018, no. 2, pp. 10–15.
- [7] Fokin S.V., Fomina O.A. *Ob ispol'zovanii matematicheskikh metodov modelirovaniya rubitel'nykh mashin* [On the use of mathematical methods for modeling chippers] *Materialy 17-y Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Fundamental'nye issledovaniya, metody i algoritmy prikladnoy matematiki v tekhnike, meditsine i ekonomike»* [Materials of the 17th International Youth Scientific and Practical Conference «Fundamental Research, Methods and Algorithms of Applied Mathematics in Engineering, Medicine and Economics»], Novochoerkassk, September 06–07, 2018. Novochoerkassk: Lik, 2018, pp. 158–159.
- [8] Linnik V. Yu., Linnik Yu. N. *Sostoyanie i perspektivy razvitiya bioenergetiki* [State and prospects of bioenergy development] *Vestnik universiteta* [University Bulletin], 2019, no. 10, pp. 59–66. DOI 10/26425 / 1816-4277-2019-10-59-66

- [9] Fokin S.V., Shport'ko O.N. *Osnovnye ekologicheskie i lesotekhnicheskie trebovaniya, pred'yavlyаемые k rubitel'nyim mashinam frezernogo tipa dlya izmel'cheniya drevesiny* [The main environmental and forestry requirements for chipper milling machines for wood chopping] *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice], 2015, v. 3, no. 2, pp. 144–146.
- [10] Fokin S.V. *Sovershenstvovanie tekhnicheskikh sredstv pererabotki otkhodov lesosechnykh rabot na toplivnyuyu shchepu v usloviyakh vyrubki* [Improving the technical means of processing logging waste for fuel chips in the conditions of felling]. Moscow: INFRA-M, 2018, 187 p.
- [11] Fokin S.V., Shport'ko O.N., Burlakov A.S. *Ekologosberegayushchie tekhnologii pri vedenii sovremennykh agrolesomeliorativnykh meropriyatiy* [Ecological technologies in the conduct of modern agroforestry measures] *Nauchnaya zhizn'* [Scientific Life], 2017, no. 7, pp. 77–90.
- [12] Alekseev A.E., Dumanskiy A.I., Dumanskiy I.O. *Vybor rezhimov lazernoy termicheskoy obrabotki nozhey rubitel'nykh mashin dlya pererabotki sukhostoynoy drevesiny* [The choice of laser heat treatment of knives of chipping machines for processing dry wood] *IVUZ. Forest Journal*, 2015, no. 3 (345), pp. 84–92.
- [13] Vasil'ev S.B., Shegel'man I.R. *Formirovaniye tekhnologicheskikh protsessov i obosnovaniye parametrov oborudovaniya dlya proizvodstva tekhnologicheskoy shchepy* [Formation of technological processes and substantiation of the parameters of equipment for the production of technological chips]. Petrozavodsk: Karelian Academy of Engineering, 2000, 52 p.
- [14] Fokin S.V., Shport'ko O.N. *Obosnovaniye konstruktssii mashin frezernogo tipa dlya polucheniya biotopliva v usloviyakh lesov stepnoy i lesostepnoy zon Povolzh'ya* [Justification of the design of milling machines for biofuels in the forests of the steppe and forest-steppe zones of the Volga region] *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice], 2014, v. 5, no. 3 (10), pp. 156–160.
- [15] Syuney V.S., Seliverstov A.A., Gerasimov Yu.Yu., Sokolov A.P. *Lesosechnye mashiny v fokuse bioenergetiki: konstruktssii, proektirovaniye, raschet* [Logging machines in the focus of bioenergy: construction, design, calculation: textbook. allowance]. Joensuu: METLA, 2011, 143 p.
- [16] Golovkov S.I., Koperin I.F., Naydenov V.I. *Energeticheskoe ispol'zovaniye drevesnykh otkhodov* [Energy use of wood waste]. Moscow: Lesn. prom-st' [Forest industry], 1987, 222 p.
- [17] Fokin S.V., Shport'ko O.N., Tsyplakov V.V. *Ob ispol'zovanii drevesnykh otkhodov pri vosstanovlenii zashchitnykh lesnykh polos* [About the use of wood waste in the restoration of protective forest belts]. *Nauchnaya zhizn'* [Scientific Life], 2015, no. 6, pp. 134–142.
- [18] Fokin S.V., Fetyaev A.N. *Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovaniye primeneniya opytного obraztsa rubitel'noy mashiny* [Technical and economic rationale for the use of a prototype chopper] *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice], 2015, v. 3, no. 5–3 (16-3), pp. 201–204.
- [19] Tsygarova M.V. *Ispol'zovaniye peredvizhnoy rubitel'noy mashiny dlya pererabotki porubochnykh ostatkov pri zagotovke drevesiny i rubkakh ukhoda* [The use of a mobile chipping machine for processing logging residues during logging and thinning] *Lesa Rossii v XXI veke: materialy XI mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy internet-konferentsii, posvyashchennoy 85-letiyu Lesoinzhenernogo fakul'teta SPbGLTU i 95-letiyu kafedry sukhoputnogo transporta lesa Sankt-Peterburg* [Forests of Russia in the XXI century: materials of the XI international scientific and technical Internet conference dedicated to the 85th anniversary of the Forest Engineering Faculty of St. Petersburg State Technical University and the 95th anniversary of the Department of Land Transport of Forests St. Petersburg], October 08–10, 2014, 2014, pp. 170–172.
- [20] Kolesnikova A.V. *Lesopol'zovaniye na territorii Sibiri i Dal'nego Vostoka: sostoyaniye i dinamika* [Forest management in Siberia and the Far East: status and dynamics] *Vestnik Zabaykal'skogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Trans-Baikal State University], 2015, no. 6 (121), pp. 127–142.

## Authors' information

**Fokin Sergey Vladimirovich** — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Department of Forestry and Landscape Construction of the Saratov State Agrarian University, feht@mail.ru

**Fomina Ol'ga Aleksandrovna** — Senior Lecturer of the Department of Forestry, Woodworking and Applied Mechanics of the State Agrarian University of Northern Zauria, os-stolbova@mail.ru

Received 29.10.2019.

Accepted for publication 12.02.2020.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТОПЛИВНОЙ ДРЕВЕСИНЫ В УСЛОВИЯХ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Г.И. Кольниченко, В.А. Лавриченко, Я.В. Тарлаков, В.А. Сиротов

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

g\_kolnic@mail.ru

В статье представлены результаты оценки потенциала древесных топливных ресурсов России, рассмотрена их классификация и показано отличие современных видов топлива из отходов древесины, позволяющих автоматизировать процессы их загрузки, приведены результаты анализа отечественного и зарубежного опыта применения средств автономного тепло- и электроснабжения, работающих на древесном биотопливе. Дана также оценка эффективности автономных тепло- и электростанций с использованием топливной древесины как источника тепла для целей бытового и производственного отопления. Показано, что их применение кроме экономической эффективности предполагает получение весьма важного социального эффекта — возможности создания относительно комфортных условий для жизни и экономической деятельности в лесных регионах нашей страны, не имеющих доступа к газовым и электрическим сетям. Поставлена задача — привлечь внимание к практическим проблемам использования древесного сырья, реализации федеральных и региональных программ развития деревянного домостроения и малого предпринимательства в лесном комплексе. При решении проблем малой энергетики и получения отдачи в краткосрочной перспективе требуется государственная поддержка для инвестиций предпринимателям среднего и особенно малого бизнеса.

**Ключевые слова:** малая распределенная энергетика, электроснабжение, возобновляемые источники энергии

**Ссылка для цитирования:** Кольниченко Г.И., Лавриченко В.А., Тарлаков Я.В., Сиротов В.А. Использование топливной древесины в условиях распределенной энергетики // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 2. С. 74–80. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-74-80

Мировая экономическая система, функционирующая по законам рынка, диктует необходимость эффективно использовать в энергетических целях биомассу, в которой важное место занимают возобновляемые древесные ресурсы как источник древесного топлива. Под древесным топливом понимают биотопливо, производимое из малоценной и низкокачественной древесины, а также из отходов древесного сырья, образующихся в процессе выращивания, заготовки и переработки древесины и состоящих из древесины, коры, хвои и листьев [1–3].

Биотопливо — это не только возможный источник тепла и генерации электроэнергии, но и способ утилизации разнообразных отходов, которые всегда накапливаются там, где живут и работают люди.

Мировой опыт показывает, что в перспективе потенциал возобновляемых древесных ресурсов может обеспечить заметный прирост энергетического потенциала странам со значительными лесными ресурсами. Россия располагает большими возможностями для производства энергии из биотоплива, так как на ее территории находятся свыше 20 % мировых запасов древесины. Большое количество отходов, получаемых при заготовке и переработке леса, позволяет расширить внедрение технологий производства тепловой и электрической энергии из древесины [4–7].

Древесная биомасса является наиболее экологически безопасным топливом после природ-

ного газа. Не будучи утилизированной полезно, биомасса все равно с течением времени сгниет с образованием такого же, что и при полезном ее сжигании количества углекислого газа [8, 9].

В лесном комплексе биоэнерготехнологии становятся все более востребованными в связи с внедрением все большего числа средств малой распределенной энергетики, которая рассматривается сегодня как важная составляющая в развитии мировой энергетики. Входящая в состав распределенной энергетики малая генерация электроэнергии меняет в широчайших масштабах традиционный уклад систем энергообеспечения. В настоящее время доля распределенной энергетики в общем балансе России оценивается в 7...10 %. Главной причиной для ее развития в условиях России являются огромные размеры территории страны и труднодоступность многих ее районов для централизованного энергообеспечения: свыше 60 % территории не охвачено централизованным электроснабжением [10–14]. Поэтому для отдельных районов (зачастую отдаленных лесных поселков) распределенная генерация, в том числе на основе возобновляемых источников позволяет решить вопросы энергообеспечения. Отказ от строительства линий электропередач приблизит к потребителю выработку электроэнергии собственными источниками, снизит затраты на транспорт и уменьшит потери при ее транспортировке по электрическим сетям. В связи с этим расширяется круг промышленных

предприятий, которые переходят на собственную генерацию электроэнергии. Внедрение распределенной энергетики на предприятия сопровождается такими недостатками, как необходимость осуществлять непрофильную деятельность, обеспечивая безопасность источников электроэнергии и нанимая дополнительный персонал, что снижает их конкурентоспособность. Однако распределенная энергетика приобретает ключевое значение при масштабном использовании экологически чистых источников электроэнергии и развитии интеллектуальной энергетики. Вследствие децентрализации и цифровизации в перспективе будут преодолены традиционные границы между производителями электроэнергии, распределительными и сетевыми компаниями и потребителями, а их взаимодействие примет более сложные формы, в связи с чем будут заложены новые принципы функционирования объектов распределенной генерации в составе Единой энергетической системы (ЕЭС) России. Эта концепция активных энергетических комплексов промышленного типа была одобрена на заседании рабочей группы по совершенствованию законодательства, созданной в рамках Национальной технологической инициативы. На пути развития распределенной энергетики существует немало барьеров, есть даже опасение, что она отрицательно скажется на благополучном функционировании ЕЭС страны, поскольку приведет к быстрому сокращению ее финансовой базы. Поэтому в масштабе страны наиболее реальной представляется модель последовательной и разумной комбинации крупной генерации ЕЭС и распределенной энергетики [15–17].

География размещения объектов малой распределенной энергетики будет только расширяться, так как ее установки становятся более привлекательными для потребителей, заинтересованных в экономии собственных денежных средств на энергоснабжение. Возрастающие тарифы на электроэнергию от централизованных источников оказываются выше затрат на электроэнергию от собственных (автономных) источников.

В лесном комплексе множество удаленных от централизованного энергоснабжения поселков могут снабжаться теплом и электроэнергией от собственных автономных источников на древесном топливе [18–22].

По форме и способу производства древесное топливо может быть необлагороженным и облагороженным. К первому обычно относят дрова, щепу, стружку, опилки, отходы от раскряжевки и лесопиления, ко второму, специально произведенному из необлагороженного, — топливные брикеты, пеллеты, таблетки, древесный уголь, газогенераторный газ, этиловый спирт и др.

Широкое применение для энергетических целей нашли древесные топливные брикеты и древесные топливные гранулы, или пеллеты.

Древесные топливные брикеты получают методом прессования предварительно измельченной и высушенной древесной топливной биомассы, которая предназначена для энергетического использования в печах, каминах, очагах небольшой мощности с ручной топливоподачей.

Древесные топливные гранулы получают методом прессования и грануляции предварительно высушенной, измельченной, кондиционированной (подвергнутой термовлажной обработке) топливной древесной биомассы. Они являются возобновляемым экологически сбалансированным топливом и предназначены для использования в автоматизированных энергогенерирующих установках малой и средней мощности. Для установок большой мощности их перед использованием измельчают в тонкодисперсный порошок.

Применение гранул в качестве энергетического топлива позволяет осуществлять управление и регулирование топочными процессами, что значительно повышает их эффективность вследствие улучшения характеристик топлива, упрощения технологии подготовки топлива, его транспортировки и хранения. В результате снижаются затраты на производство энергии, повышается эффективность как самого производства, так и энергетических ресурсов древесной топливной биомассы. Производство пеллет возможно и из не востребованного нетрадиционного сырья, включающего в себя примеси коры, листвы и хвои, т. е. из лесосечных отходов и древесно-кустарниковой растительности. Целесообразность организации производства пеллет и брикетов из не востребованных энергоресурсов зависит, прежде всего, от объемов сырьевой базы [4].

Производство топливных гранул должно быть частью основных процессов производства пиломатериалов, древесно-стружечных и древесноволокнистых плит, бумаги и т. д.

Россия — один из лидеров экспортирования топливных гранул — 1,5 млн т/год на сумму всего 10 млрд руб., тем не менее этот сектор экономики показывает устойчивый рост — до 30 % в год. Для производства топливных гранул можно использовать опилки, кору, солому, лузгу подсолнечника, торф и даже листья растений (в частности, такой город, как Москва в осенний сезон дает 1 млн т листвы, которую просто закапывают в землю). Россия способна увеличить выпуск гранул в 100 раз в течение ближайших 10...20 лет.

Весьма распространенным и важным видом древесного топлива является топливная щепа. Ее получают путем разрушения древесины с помощью ножеобразного инструмента. Организация

производства щепы из дровяной древесины описана во многих литературных источниках [1, 3].

В настоящее время в России существует огромное количество не востребованного сырья для производства топливной щепы. Это в первую очередь лесосечные отходы от рубок главного и промежуточного пользования, рубок ухода и прореживания, отходы на объектах мелиорации, при расчистке полосы отвода дорог, линий электропередач, трасс нефте- и газопроводов и др. Поэтому актуальность приобретают задачи организации эффективного производства древесного топлива из не востребованных энергоресурсов.

В некоторых регионах России существует практика предоставления из регионального (республиканского) бюджета субсидий на компенсацию части затрат на организацию производства щепы, брикетов и гранул, что стимулирует создание новых предприятий в этой сфере. Внутренний рынок биотоплива до сих пор находится в стадии становления и по сравнению с мировым рынком пока не устойчив. Тормозит развитие биоэнергетики лесного комплекса страны недостаток знаний в этой области и отсутствие инвестиций на создание и приобретение необходимого оборудования.

## Цель работы

Цель работы — привлечь внимание ученых, инженеров, предпринимателей к практическим проблемам использования древесного сырья.

Анализ экологических аспектов использования древесного топлива показывает следующее. Россия, располагая богатейшими запасами газа, занимает ныне первое место по его экспорту. При нынешнем курсе доллара, ценах на газ на внешнем рынке и стоимости его для внутреннего потребления предоставление газа для бытовых и производственных нужд отечественному (т. е. российскому) потребителю оборачивается для газпрома существенно меньшей выручкой, чем экспортные поставки. Поэтому за последние 15 лет уровень газификации страны, по статистической отчетности, вырос всего на 2 % и составляет менее 65 %. Напомним, что экспорт углеводородов является одним из основных источников «наполнения» бюджета.

## Материалы и методы исследования

В последние годы расширился интерес к использованию древесины для производства топлива. Облагораживание древесного топлива до однородной сыпучей подсушенной массы позволяет существенно снизить трудоемкость сжигания щепы, пеллет и др. благодаря созданию новых конструкций печей, механизации и автоматизации технологического процесса получения сырья для отопления.

Экономическая выгода от использования древесины для нужд по обеспечению тепла можно определить по следующим простым расчетам. Для отопления дома площадью 250 м<sup>2</sup> в средней полосе России требуется примерно 6 500 м<sup>3</sup> природного газа при средней стоимости 6 руб. за 1 м<sup>3</sup>, т. е. общая стоимость — 39 000 руб. в год. Теплотворная способность 1 кг топливной щепы в 3 раза ниже, чем у 1 м<sup>3</sup> природного газа. При отоплении такой же площади потребуется 70 м<sup>3</sup> щепы при ее удельной плотности 300 кг/м<sup>3</sup> и цене 400 руб. за 1 м<sup>3</sup>, т. е. общая стоимость — 28 000 руб. в год. Экономия составляет 28,5 %. Инвестиции (единовременные затраты) на котельные установки по обоим вариантам можно принять равными. При этом нет необходимости оплачивать работы по проектированию, прокладке газовой магистрали, согласовывать проект в надзорных органах. Важно учитывать, что образующаяся при сгорании щепы и другого древесного топлива зола представляет собой ценное удобрение, которое содержит комплекс микроэлементов.

На рынке энергетического оборудования, использующего биотопливо, появилось много предложений котельных установок различной мощности и конструкций. При выборе их следует учитывать различия в соотношениях необходимой мощности, надежности работы, трудоемкости эксплуатации и стоимости.

Локальное генерирование электроэнергии на основе биотоплива является более сложной задачей — тепловую энергию от сжигания древесины необходимо преобразовывать в электрическую. И в этом направлении уже есть значительные достижения. В последнее время сформировался рынок зарубежных и отечественных автономных электростанций на основе газопоршневых установок в комплексе с газо- и электрогенераторами [11]. Газопоршневые электростанции (ГПЭС) представляют собой систему из газопоршневого двигателя с турбонаддувом, стартера и зарядного генератора. Среди всех силовых агрегатов данный тип установок отличается простотой, надежностью и самым высоким электрическим КПД, что позволяет говорить о нем как о наиболее привлекательном для потребителя.

Для производства одного и того же объема электроэнергии газопоршневые электростанции по сравнению с турбинами расходуют меньше природного газа (на 1/3).

Этот способ получения газа при термическом разложении древесины (пиролиз), известен еще со времен Великой Отечественной войны, когда автомобили передвигались при отсутствии бензина, используя газ из смонтированных на них газогенераторных установок для сжигания древесных чурок.

В последнее время широко рекламируются контейнерные электростанции с парогенераторами, которые характеризуются высокой эффективностью работы [11]. Для них не требуется строительство капитальных зданий, а достаточно всего лишь несколько фундаментных блоков или плит. Затраты на производство 1 кВт×ч электроэнергии, по заверениям фирм-производителей и дилеров, на газопоршневых и парогенераторных электростанциях составляют 1–2 руб., что в 2–3 раза дешевле тарифов на электроэнергию, поставляемую сетевыми компаниями. При этом инвестиции окупаются за 3–4 года за счет экономии на тарифах.

Применяются и другие способы производства электроэнергии, в частности, термоэлектрический, — посредством которого электроэнергия образуется при непосредственном нагревании термопары (термогенератор Пельтье). Термоэлектрические генераторы, работающие на древесном топливе, используются в основном в удаленных и трудно доступных местах для подзарядки элементов питания индивидуальных средств связи (сотовых и спутниковых телефонов, переносных компьютеров, радиоприемников), навигации, устройств автоматики, освещения и др. Мощность таких генераторов составляет от нескольких до сотен ватт.

Для внедрения малой распределенной генерации на предприятиях целесообразно устанавливать блочно-модульные мини-теплоэлектростанции (мини-ТЭС) [8, 10]. Блоками мощностью 1–2 МВт можно собрать объект общей мощностью до 10 МВт. При этом поставка и монтаж оборудования займут 6...12 мес., а первую электроэнергию можно получить уже через 2 недели после доставки необходимых элементов. Себестоимость производства 1 кВт×ч электроэнергии посредством мини-ТЭС составляет от 1,1 до 1,7 руб., окупятся они в течение 3,5–4,5 лет. Подобные российские проекты конкурентоспособны даже на мировом рынке, в первую очередь ввиду низкой стоимости установки. Указанные параметры характеризуют мини-ТЭС, использующие природный газ, а если применять древесное топливо, они еще больше будут снижены даже с учетом затрат на подготовку древесного газа.

Удельные инвестиции (на 1 кВт электрической мощности) примерно соответствуют затратам на подключение к сетям (проектирование, прокладку ЛЭП, установку силовых трансформаторов и т. д.). При этом, преодолев трудности и потери времени на получение разрешения и многочисленные согласования, потребители при эксплуатации сталкиваются с регулярным повышением тарифов и оплатой штрафов за небольшой перерасход или недобор электроэнергии от заявленного ее количества.

В странах ЕС при подключении локальных электростанций к сетям предприятиям устанавливаются субсидируемые тарифы, в результате чего производство электроэнергии с использованием малоценной топливной древесины становится выгоднее, при этом в экономику вовлекаются дополнительные энергетические ресурсы.

Одна из таких электростанций мощностью 450 кВт находится в Латвии, в 80 км от г. Риги. Она состоит из 10 агрегатов, представляющих собой комплексы — газогенератор, газопоршневой мотор и электрогенератор мощностью 45 кВт. Общее потребление древесной щепы составляет 270 м<sup>3</sup> в неделю (поставка щеповозом по 90 м<sup>3</sup>), по цене 10 евро за 1 м<sup>3</sup>. Обслуживает электростанцию персонал в количестве 5 чел.

Электростанция поставляет электроэнергию сетевой компании Латвэнерго по 0,135 евро за 1 кВт×ч (в 2015 г. тариф составил 0,20 евро за 1 кВт×ч, что и побудило собственников-инвесторов к созданию станции). Тепловая энергия в виде горячей воды для отопления и бытового потребления реализуется расположенному поблизости жилому поселению. Отходы производства в виде древесной золы покупает сельскохозяйственная фирма в Польше.

Инвестиции на указанный проект по льготному кредиту составили 3 млн евро, что, на наш взгляд, неоправданно дорого, соответственно, и срок окупаемости оказался довольно большим. Есть нарекания персонала по надежности газогенераторных и газопоршневых агрегатов (ошибочный выбор оборудования при проектировании). Однако электростанция работает уже 3 года, и частная фирма имеет прибыль, рассчитывается по кредиту и накапливает производственный опыт. Возникла цепочка добавленной стоимости от низкосортной невостребованной древесины до тепловой и электрической энергии. Появилось также два десятка новых рабочих мест. В 2019 году была проведена замена оборудования с учетом имеющегося опыта, оказавшегося гораздо эффективнее, чем при первоначальном проекте. Подобных электростанций, работающих на древесном топливе, в этой прибалтийской республике уже несколько.

В работе [6] представлены технико-экономические показатели для проекта ТЭС на древесном топливе для небольшого лесопильно-деревообрабатывающего предприятия в пос. Нарым Томской обл. При инвестициях в размере 85 млн руб. (оборудование отечественных производителей) максимальная электрическая мощность потребителей может составить 1,2 МВт, тепловая — 7,8 МВт. При исходных данных проекта на момент расчета срок окупаемости инвестиций за счет экономии затрат на собственное производ-

ство электроэнергии по сравнению с сетевыми тарифами составил всего 20 мес.

Конечно, вряд ли кто-нибудь откажется от уже подведенного сетевого газа или электроэнергии, однако производство собственной энергии становится все более инвестиционно привлекательным.

## Результаты и обсуждение

Наибольшая ценность автономных ТЭС, использующих топливную древесину, заключается в обеспечении условий для эффективной экономической деятельности в лесных районах на территориях, не имеющих доступа к централизованным газовым и электрическим сетям, в удаленных поселках, в которых строят деревянные дома (срубы) вручную с помощью топоров или, в лучшем случае применяют бензопилы.

Особенно это важно в связи с реализацией федеральных и региональных программ развития деревянного домостроения и малого предпринимательства в лесном комплексе. Деревянное домостроение позволит использовать малозаселенные территории в нашей стране, а малые деревообрабатывающие предприятия будут эффективнее использовать ее лесные богатства, в том числе низкосортную древесину как топливо. Для решения этих задач имеется все необходимые технические и технологические предпосылки, в частности обеспечение доступа малому бизнесу к недорогим долгосрочным целевым кредитам на приобретение установок малой энергетики.

## Выводы

1. Интеграция России в мировую экономическую систему обуславливает необходимость более эффективного использования в энергетических целях биомассы и особо возобновляемых древесных ресурсов как источника древесного топлива.

2. Распределенная энергетика и входящая в ее состав малая генерация изменяет традиционный уклад энергообеспечения на все большей территории страны, в том числе в лесных районах.

3. Наличие большого количества отходов, получаемых при заготовке и переработке леса, обуславливают расширение и внедрение в России технологий производства тепловой и электрической энергии из древесины, тем самым обеспечивая заметный прирост энергетического потенциала в районах со значительными объемами лесных ресурсов.

4. Наибольшую ценность автономных ТЭС с использованием топливной древесины составляет создание условий для эффективной экономической деятельности в лесных районах, в первую очередь, не имеющих доступа к газовым и электрическим сетям.

5. Внедрение средств распределенной энергетики создает благоприятные предпосылки для успешной реализации федеральных и региональных программ развития деревянного домостроения и малого предпринимательства в лесном комплексе. Деревянное домостроение позволит рационально использовать малозаселенные пространства нашей страны, а малые деревообрабатывающие предприятия — ее лесные богатства, в том числе, низкосортную древесину как топливо.

## Список литературы

- [1] Кожухов Н.И., Никишов В.Д., Федоренчик А.С., Ледницкий А.В. Биотопливо из древесного сырья. М.: МГУЛ, 2010. 384 с.
- [2] U.S. Department of Energy. 2016 Billion-Ton Report: Advancing Domestic Resources for a Thriving // Bioeconomy, vol. 1: Economic Availability of Feedstocks / M.H. Langholtz, B.J. Stokes, and L.M. Eaton (Leads), ORNL/TM-2016/160. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN. 2016. 448p. DOI: 10.2172/1271651.
- [3] Лесная биоэнергетика / под ред. Ю.П.Семенова. М.: МГУЛ, 2008. 348 с.
- [4] Вавилов А.В. Топливо из нетрадиционных энергоносителей. Минск: СтройМедиаПроект, 2014. 88 с.
- [5] Burning wood in power stations: Public health impacts. URL: <http://www.biofuelwatch.org.uk/wp-content/uploads/Biomass-Air-Pollution-Briefing.pdf> (дата обращения 05.06.2019)
- [6] Левин А.Б., Суханов В.С. Производство энергии с использованием древесного топлива // Дерево.RU, 2005. № 3. С. 122–125.
- [7] Goerndt M.E., Aguilar F.X., Miles P., Song N., Shifley S., Stelzer H. Regional assessment of woody biomass physical availability as an energy feedstock for combined combustion in the U.S. Northern Region // J. of Forestry, 2012, no. 110(3), pp. 138–148.
- [8] Федеральная служба государственной статистики: лесные ресурсы. URL: [http://www.gks.ru/bgd/regl/B\\_13\\_14p/IssWWW.exe/Stg/d2/11-09.htm](http://www.gks.ru/bgd/regl/B_13_14p/IssWWW.exe/Stg/d2/11-09.htm). (дата обращения 10.06.2019).
- [9] Perlack R., Wright L.L., Turhollow A.F., Graham R.L., Stokes B.C., Erblich D. Biomass as feedstock for a bioenergy and bioproducts industry: the technical feasibility of a billion-ton annual supply. Oak Ridge National Laboratory, 2005. URL: [http://www1.eere.energy.gov/biomass/pdfs/final\\_billionton\\_vision\\_report2.pdf](http://www1.eere.energy.gov/biomass/pdfs/final_billionton_vision_report2.pdf), (дата обращения 10.09.2018).
- [10] Попель О.С., Фортвов В.Е. Энергетика в современном мире. Долгопрудный: Интеллект, 2011. 168 с.
- [11] Изменение климата: обобщающий доклад. Вклад рабочих групп I, II и III в пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата / под ред Р.К. Пачаури и Л.А. Мейер. Женева, Швейцария: МГЭИК, 2014. 163 с.
- [12] Nivala M., Anttila P., Laitila J., Salminen O., Flyktman M. A GIS-based methodology to estimate the regional balance of potential and demand of forest chips // J. of Geographic Information Systems, 2016, no. 8, 633–662.
- [13] Головкин С.И., Коперин И.Ф., Найденов В.И. Энергетическое использование древесных отходов. М.: Лесная пром-сть, 1987. 224 с.
- [14] Goerndt M.E., D'Amato A., Kabrick J. Chapter 4: Wood Energy and Forest Management // Wood Energy in Developed Economies / Ed F.X. Aguilar. London, UK: Earthscan Publishing, 2014, pp. 93–127.

- [15] Леса, лесные ресурсы и лесоуправление в Российской Федерации. Справочный документ. Москва, 2012. 48 с.
- [16] Батенин В.М., Бессмертных А.В., Зайченко В.М., Косов В.Ф., Синельщиков В.А. Термические методы переработки древесины и торфа в энергетических целях // Теплоэнергетика, 2010. № 11. С. 36–42.
- [17] BP Statistical Review of World Energy. June 2016. URL: <http://www.bp.com/statisticalreview> (дата обращения 05.06.2019).
- [18] Lattimore B., Smith C.T., Titus B.D., Stupak I., Egnell G. Environmental factors in woodfuel production: Opportunities, risks, and criteria and indicators for sustainable practices // Biomass and Bioenergy, 2009, no. 33(10), pp. 1321–1342.
- [19] Малоизвестное оборудование для производства электроэнергии. 2016. URL: <http://nnhpe.spbstu.ru/maloizvestnoe-oborudovanie-dlya-proizvodstva-elektroenergii/> (дата обращения 15.06.2019).
- [20] Токарев Г.Г. Газогенераторные автомобили. М.: ГНТ изд-во машиностроительной литературы, 1955. 207 с.
- [21] Подлесная Т.А. Разработка и исследование газотурбинного энергопреобразователя реактора-газификатора твердых бытовых и промышленных отходов: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.12. М., 2008. 154 с.
- [22] Обзор современных ПТУ малой мощности (до 1000 кВт). Санкт-Петербург: ООО НТЦ «МТТ», 2015. 41 с. URL: <http://nnhpe.spbstu.ru/wp-content/uploads/2015/02/Obzor-PTU-maloy-moshchnosti.pdf> (дата обращения 05.08.2019).

## Сведения об авторах

**Кольниченко Георгий Иванович** — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), [g\\_kolnic@mail.ru](mailto:g_kolnic@mail.ru)

**Лавриченко Валерий Алексеевич** — канд. экон. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), [valavr1@yandex.ru](mailto:valavr1@yandex.ru)

**Тарлаков Яков Викторович** — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), [tarlakov@mgul.ac.ru](mailto:tarlakov@mgul.ac.ru)

**Сиротов Александр Владиславович** — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), [sirovov1953@gmail.com](mailto:sirovov1953@gmail.com)

Поступила в редакцию 14.10.2019.

Принята к публикации 18.02.2020.

## FUEL WOOD FOR DISTRIBUTED POWER GENERATION

**G.I. Kolnichenko, V.A. Lavrichenko, Y.V. Tarlakov, A.V. Sirovov**

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

[g\\_kolnic@mail.ru](mailto:g_kolnic@mail.ru)

The article presents the results of assessing the potential of wood fuel resources of Russia, their classification is considered, and the difference between modern types of fuel from wood waste, which automates the processes of loading them, is shown, the results of the analysis of domestic and foreign experience in the use of autonomous heat and power supplies operating on wood biofuel are presented. The efficiency of autonomous heat and power plants using fuel wood as a heat source for domestic and industrial heating is also evaluated. It is shown that their use, in addition to economic efficiency, involves obtaining a very important social effect the possibility of creating relatively comfortable living conditions and economic activities in the forest regions of our country that do not have access to gas and electricity networks. The aim is to draw attention to the practical problems of using wood raw materials, the implementation of federal and regional programs for the development of wooden housing construction and small business in the forest complex. In solving the problems of small energy and obtaining returns in the short term, government support is required for investments for entrepreneurs of medium and especially small businesses.

**Keywords:** small distributed power generation, power supply, renewable energy sources

**Suggested citation:** Kolnichenko G.I., Lavrichenko V.A., Tarlakov Y.V., Sirovov A.V. *Ispol'zovanie toplivnoy drevesiny v usloviyakh raspredelennoy energetiki* [Fuel wood for distributed power generation]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 2, pp. 74–80. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-74-80

## References

- [1] Kozhukhov N.I., Nikishov V.D., Fedorenchik A.S., Lednitskiy A.V. *Bioplivo iz drevesnogo syr'ya* [Biofuel from wood raw materials]. Moscow: MGUL, 2010, 384 p.
- [2] U.S. Department of Energy. 2016.16 Billion-Ton Report: Advancing Domestic Resources for a Thriving Bioeconomy, Volume 1: Economic Availability of Feedstocks. M.H. Langholtz, B.J. Stokes, and L.M. Eaton (Leads), ORNL / TM-2016/160. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, 448 p. DOI: 10.2172 / 1271651
- [3] *Lesnaya bioenergetika* [Forest bioenergy]. Ed. Yu.P. Semenova. Moscow: MGUL, 2008, 348 p.

- [4] Vavilov A.V. *Toplivo iz netraditsionnykh energoresursov* [Fuel from non-traditional energy sources]. Minsk: StroyMediaProekt, 2014, 88 p.
- [5] Burning wood in power stations: Public health impacts. URL: <http://www.biofuelwatch.org.uk/wp-content/uploads/Biomass-Air-Pollution-Briefing.pdf> (accessed 06.06.2019).
- [6] Levin A.B., Sukhanov V.S. *Proizvodstvo energii s ispol'zovaniem drevesnogo topliva* [Energy production using wood fuel]. Derevo.RU, 2005, no. 3, pp. 122–125.
- [7] Goerndt M.E., Aguilar F.X., Miles P., Song N., Shifley S., Stelzer H. Regional assessment of woody biomass physical availability as an energy feedstock for combined combustion in the U.S. Northern Region. *J. of Forestry*, 2012, no. 110 (3), pp. 138–148.
- [8] *Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki: lesnye resursy* [Federal State Statistics Service: forest resources]. URL: [http://www.gks.ru/bgd/regl/B13\\_14p/IssWWW.exe/Stg/d2/11-09.htm](http://www.gks.ru/bgd/regl/B13_14p/IssWWW.exe/Stg/d2/11-09.htm). (accessed 06.10.2019)
- [9] Perlack R., Wright L.L., Turhollow A.F., Graham R.L., Stokes B.C., Erbach D. Biomass as feedstock for a bioenergy and bio-products industry: the technical feasibility of a billion-ton annual supply. Oak Ridge National Laboratory, 2005. URL: [http://www1.eere.energy.gov/biomass/pdfs/final\\_billionton\\_vision\\_report2.pdf](http://www1.eere.energy.gov/biomass/pdfs/final_billionton_vision_report2.pdf). (accessed 10.09.2018).
- [10] Popel' O.S., Fortov V.E. *Energetika v sovremennoy mire* [Energy in the modern world]. Dolgoprudny: Intellect, 2011, 168 p.
- [11] *Izmenenie klimata: Obobshchayushchiy doklad. Vklad Rabochikh grupp I, II i III v Pyatyy otsenochnyy doklad Mezhpravitel'stvennoy gruppy ekspertov po izmeneniyu klimata* [Climate change: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change]. Ed. By R.K. Pachauri, L.A. Meyer. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014, 163 p.
- [12] Nivala M., Anttila P., Laitila J., Salminen O., Flyktman M. A GIS-based methodology to estimate the regional balance of potential and demand of forest chips. *J. of Geographic Information Systems*, 2016, no. 8, 633–662.
- [13] Golovkov S.I., Koperin I.F., Naydenov V.I. *Energeticheskoe ispol'zovanie drevesnykh otkhodov* [Energy use of wood waste]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest industry], 1987, 224 p.
- [14] Goerndt M.E., D'Amato A., Kabrick J. Chapter 4: Wood Energy and Forest Management. *Wood Energy in Developed Economies*. Ed F.X. Aguilar. London, UK: Earthscan Publishing, 2014, pp. 93–127.
- [15] Lesa, lesnye resursy i lesoupravlenie v Rossiyskoy Federatsii. Spravochnyy dokument [Forests, forest resources and forest management in the Russian Federation. Reference document]. Moscow, 2012, 48 p.
- [16] Batenin V.M., Bessmertnykh A.V., Zaychenko V.M., Kosov V.F., Sinel'shchikov V.A. *Termicheskie metody pererabotki drevesiny i torfa v energeticheskikh tselyakh* [Thermal methods of processing wood and peat for energy purposes]. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 2010, no. 11, pp. 36–42.
- [17] BP Statistical Review of World Energy. 2016. URL: <http://www.bp.com/statisticalreview> (accessed 06.06.2019).
- [18] Lattimore B., Smith C.T., Titus B.D., Stupak I., Egnell G. Environmental factors in woodfuel production: Opportunities, risks, and criteria and indicators for sustainable practices. *Biomass and Bioenergy*, 2009, no. 33 (10), pp. 1321–1342.
- [19] *Maloizvestnoye oborudovanie dlya proizvodstva elektroenergii* [Little-known equipment for the production of electricity]. 2016. URL: <http://nnhpe.spbstu.ru/maloizvestnoye-oborudovanie-dlya-proizvodstva-elektroenergii/> (accessed 15.06.2019).
- [20] Tokarev G.G. *Gazogeneratorynye avtomobili* [Gas generating cars]. Moscow: GNT publishing house of engineering literature, 1955, 207 p.
- [21] Podlesnaya T.A. *Razrabotka i issledovanie gazoturbinogo energopreobrazovatelya reaktora-gazifikatora tverdykh bytovykh i promyshlennykh otkhodov* [Development and research of a gas-turbine power converter of a reactor-gasifier for solid domestic and industrial waste]. Diss. Sci. (Tech.). 05.04.12. Moscow, 2008, 154 p.
- [22] *Obzor sovremennykh PTU maloy moshchnosti (do 1000 kVt)* [A review of modern low-power vocational schools (up to 1000 kW)]. St. Petersburg: NTTs MTT LLC, 2015. 41 p. URL: <http://nnhpe.spbstu.ru/wp-content/uploads/2015/02/Obzor-PTU-maloy-moshchnosti.pdf> (accessed 08.08.2019).

## Authors' information

**Kol'nichenko Georgiy Ivanovich** — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), [g\\_kolnic@mail.ru](mailto:g_kolnic@mail.ru)

**Lavrchenko Valeriy Alekseevich** — Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), [valavr1@yandex.ru](mailto:valavr1@yandex.ru)

**Tarlakov Yakov Viktorovich** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), [tarlakov@mgul.ac.ru](mailto:tarlakov@mgul.ac.ru)

**Siroto Aleksandr Vladislavovich** — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), [siroto1953@gmail.com](mailto:siroto1953@gmail.com)

Received 14.10.2019.

Accepted for publication 18.02.2020.

## МИКОЛИЗ ДРЕВЕСИНЫ, ЕГО ПРОДУКТЫ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

### I. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МИКОЛОГИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ

Г.Н. Кононов, А.Н. Веревкин, Ю.В. Сердюкова, В.Д. Зайцев

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

kononov@mgul.ac.ru

Статья посвящена вопросам экологии миколиза древесины. Рассмотрены основные виды ксилофитов хвойных и лиственных древесных пород. Приведены сведения о распространенности дереворазрушающих грибов, относящихся к различным систематическим группам на основных лесообразующих породах, и о продолжительности полного разрушения древесины под их воздействием в лесах европейской части России. Проанализировано влияние фунгитоксичных соединений древесины на дереворазрушающую способность ксилофитов и влияние минерального питания на их активность. Данная статья является первой в цикле «Миколиз древесины, его продукты и их использование», в котором планируется опубликовать ряд статей: «II. Биолого-морфологические процессы микологического разрушения древесины»; «III. Физиология и биохимия миколиза древесины»; «IV. Компонентный состав микологически разрушенной древесины»; «V. «Бурая гниль» древесины как природный композит и источник полупродуктов»; «VI. «Белая гниль» древесины как волокнистый полуфабрикат и химическое сырье»; «VII. «Дереворазрушающие грибы как продуценты биологически активных веществ».

**Ключевые слова:** базидиомицеты, ксилофиты, дереворазрушающие грибы, миколиз, «гнили древесины»

**Ссылка для цитирования:** Кононов Г.Н., Веревкин А.Н., Сердюкова Ю.В., Зайцев В.Д. Миколиз древесины, его продукты и их использование. I. Экологические аспекты микологического разрушения древесины // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 2. С. 81–87. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-81-87

О масштабах процесса синтеза и разложения органических веществ в зональных типах лесов можно судить по объему годового прироста и опада древесной фитомассы. Так, для смешанных лесов эти показатели колеблются в пределах 7...20 т/га и 2...7 т/га соответственно [1]. Среди лесообразующих пород европейской части Российской Федерации наиболее продуктивной является береза. При возрасте древостоя 70 лет, в 1,5–3 раза меньшего, чем у других лесообразующих пород (ели, сосны), масса ее стволовой древесины в некоторых случаях в 2 раза превышает их массу, при этом до 50 % углерода, ассимилируемого при фотосинтезе, у этой древесной породы закрепляется в составе древесины, впоследствии разлагаемой в естественных условиях под действием различных факторов [2]. Наиболее мощным из этих факторов является микологический, подразумевающий деятельность дереворазрушающих грибов, подвергающих древесину так называемому гниению, т. е. миколизу — процессу деградации компонентов лигноуглеводного комплекса древесины под действием ферментов дереворазрушающих грибов, приводящему к образованию «гнилей древесины» [3].

В США ежегодные убытки от «гниения» древесины составляют 300 млн дол. В Западной Европе ежегодные потери деловой древесины только вследствие поражения лесов корневой губкой достигают 15...20 млн евро. Из общего количества заготавливаемой в Российской Федерации деловой древесины 20 % расходуется

только для того, чтобы восполнить ее потери от микологического разрушения [4, 5]. Поэтому изучение возможности использования микологически разрушенной древесины является актуальной задачей.

В настоящее время дереворазрушающие грибы рассматриваются в качестве перспективных продуцентов некоторых ценных для человека продуктов. Особый интерес к определенной группе грибов вызывает наличие у них экзоферментных комплексов, осуществляющих разложение основных компонентов древесины [6]. Создание технологии получения углеводов, фенольных соединений и некоторых других веществ на основе использования экзоферментов этих базидиомицетов открывает огромные возможности. С другой стороны, некоторые ксилофиты используются человеком в пищу [7, 8]. В ближайшее время может возникнуть необходимость в технологии искусственного выращивания съедобных ксилофитов, в целях получения белков и других биологически активных веществ, что, несомненно, требует сведений, касающихся самых различных сторон экологии этих организмов [9], являющихся одним из рекордсменов в живой природе уступающим только деревьям. Так микориза одного из ксилофитов — опенка темного, произрастающего в штате Орегон (США) — занимает площадь 889 га (1200 футбольных полей), имеет массу в 1000 т, возраст — около 2500 лет, а в 1 см<sup>3</sup> почвы содержится до 20 км гиф этого гриба [10].

**Цель работы**

Целью работы является анализ влияния экологических факторов на активность основных ксилофитов лесообразующих древесных пород и процессы микологического разрушения ими древесины.

**Материалы и методы**

В Российской Федерации описано более 850 видов базидальных дереворазрушающих грибов [11]. В разложении древесины основных лесообразующих пород — сосны, ели, лиственницы, кедра, пихты, березы, осины, липы, дуба, граба участвуют около 90 % всех изученных видов. Наибольшее количество (более 200 видов) грибов связано с разложением древесины березы, сосны и ели (табл. 1) [12, 13].

Т а б л и ц а 1

**Распределение дереворазрушающих грибов по древесным породам**

Distribution of wood-destroying fungi by tree species

Древесная порода	Трутовые (Polyporaceae)	Кортициевые (Corticiumaceae)	Ежевиковые (Hydnaceae)	Агариковые (Agaricales)
Лиственница	62 0	15 0	—	18 5
Сосна	108 8	72 16	14 6	20 10
Ель	113 9	46 7	20 0	21 3
Береза	103 4	32 4	29 2	69 23

*Примечание.* В числителе — общее число видов, в знаменателе — число доминирующих видов.



1



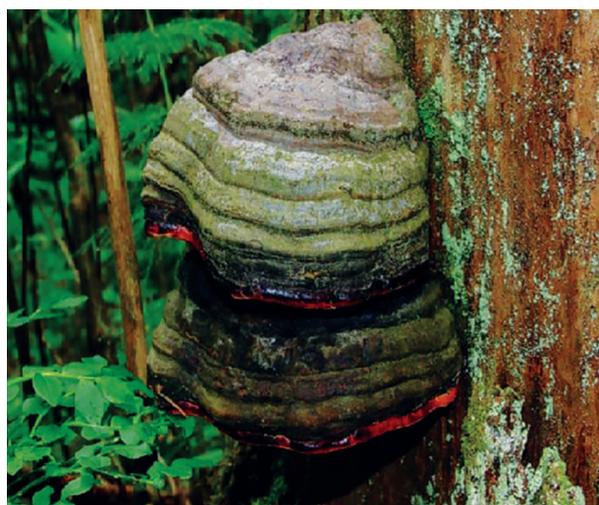
2

**Рис. 1.** Основные грибы-разрушители древесины березы: 1 — трутовик настоящий («белая гниль»); 2 — березовая губка («бурая гниль»)

**Fig. 1.** The main destructive mushrooms of birch wood: 1 — real tinder fungus («white rot»); 2 — birch polyporus («brown rot»)



1



2

**Рис. 2.** Основные грибы-разрушители древесины хвойных пород: 1 — корневая губка («пестрая гниль»); 2 — окаймленный трутовик («бурая гниль»)

**Fig. 2.** The main coniferous wood destructive fungi: 1 — mottle butt rot («mottled rot»); 2 — red belt fungus («brown rot»)

Из приведенных в табл. 1 данных видно, что наибольшее количество дереворазрушителей (233 вида) поселяются на березе, что делает ее наиболее уязвимой с точки зрения сохранности древостоя в естественных условиях [14].

Рассматривая группировки грибов в функциональном аспекте, можно выделить в их составе доминирующие виды. По численности плодовых тел можно судить о значимости вида гриба в рассматриваемом процессе миколиза. Доминирующие виды являются основными видами, от деятельности которых прежде всего зависит протекание процесса разрушения древесины. Так, численность плодовых тел настоящего трутовика и березовой губки в зрелом березняке составляет соответственно 123 и 90 шт./га [15]. Численность всех других видов разрушителей древесины березы в сумме составляет 118 шт./га [16]. Естественно, что в данных условиях основными разрушителями древесины березы являются трутовик настоящий (*Fomes fomentarius*) и березовая губка (*Piptoporus betulinus* (Fr.) Karst) (рис. 1). Аналогичные исследования свидетельствуют о том, что хвойные породы наиболее часто поражаются корневой губкой (*Fomitopsis annosa*) и окаймленным трутовиком (*Fomitopsis pinicola*) (рис. 2) [17].

## Результаты и обсуждение

В лесах европейской части России разложение древесины сосны продолжается 15...20 лет, ели — 8...12 лет, а березы всего — 4...6 лет. Это является следствием того, что древесина березы не содержит соединений фунгицидного характера в отличие от древесины хвойных пород, содержащих большое количество терпеноидов [18, 19].

Большое значение в процессах миколиза имеет реакция грибов на фунгитоксичные соединения, содержащиеся в древесине. Фунгитоксичные соединения древесины можно разделить на две группы: дубильные вещества, оказывающие на грибы общетоксичное действие, и специфически токсичные соединения — терпеноиды.

Ингибирующее действие ароматических соединений на рост грибов «белой гнили», к которым относятся дубильные вещества, усиливается при введении в их молекулы гидроксильных и метоксильных групп. Фунгитоксичность многоатомных фенолов возрастает с увеличением числа гидроксильных групп, а фенольные эфиры, особенно моноэфиры, более токсичны в отношении грибов по сравнению с фенолами.

Установлено, что грибы «белой гнили» более устойчивы к фунгитоксичным веществам фенольной природы, чем грибы, вызывающие «бурую гниль», вследствие продуцирования ими полифенолоксидаз, разрушающих лигнин. Они менее

Т а б л и ц а 2

### Влияние экстрактивных веществ коры и заболонной древесины березы на рост трутовых грибов

The effect of birch bark and sapwood extractives on the Polyporaceae growth

Вид гриба	Экстрактивные вещества	Снижение роста грибов при добавлении водных и спиртовых экстрактов, %		
		Вода при 20 °С	Вода при 100 °С	Спирт при 78 °С
Трутовик плоский ( <i>Ganoderma applanatum</i> )	кора	37,0	71,0	—
Трутовик заборный ( <i>Glocophyllum sepiarium</i> )	кора	45,0	80,0	52,0
Трутовик плоский ( <i>Ganoderma applanatum</i> )	древесина	46,0	37,0	34,0
Трутовик заборный ( <i>Glocophyllum sepiarium</i> )	древесина	38,0	39,0	40,0

чувствительны к таким фенольным соединениям, как танины, галловая кислота,  $\alpha$ -нафтол,  $\alpha$ -нафталин, по сравнению с грибами, вырабатывающими эти ферменты [20].

В разрушении древесины по типу «белой гнили» особое место занимают трутовые грибы, играющие в этом процессе исключительную роль. Для этих грибов, в основном являющихся паразитами, характерно то, что, когда дерево погибает, они развиваются на древесине уже как сапрофиты, продолжая процесс делигнификации древесины. К таким грибам относится трутовик плоский (*Ganoderma applanatum*), трутовик заборный (*Glocophyllum sepiarium*), а также опенок настоящий (*Armillaria mellea*) (рис. 3) [21, 22]. Некоторые экстрактивные вещества тормозят их рост (табл. 2).

Из приведенных данных следует, что экстрактивные вещества, извлекаемые даже холодной водой из древесины и коры березы, сильно тормозят рост дереворазрушающих грибов. Следствием этого, по-видимому, является активизация их роста на умершем дереве в качестве сапрофитов, нежели на ослабленном, но живом в качестве паразитов, в котором содержание этих веществ велико. После отмирания древесных тканей и разрушения древесины происходит вымывание этих веществ атмосферными осадками



1

2

3

Рис. 3. Грибы-паразиты «белой гнили» березы: 1 — трутовик плоский; 2 — трутовик заборный; 3 — опенок настоящий

Fig. 3. Parasitic fungi of «white rot» of birch: 1 — polypore; 2 — tinder fungus, 3 — honey agaric



1



2

Рис. 4. Грибы сапрофиты белой гнили березы: 1 — вешенка обыкновенная; 2 — пилолистник тигровый

Fig. 4. Mushrooms saprophytes white rot of birch: 1 — oyster mushroom; 2 — Panus tigrinus

и рост грибов активизируется, но кора при этом практически не разрушается. Эти процессы характеризуют разрушение сухостойной древесины [23].

Дереворазрушающая активность сапрофитов варьируется в зависимости от состава питательной среды [24]. Наиболее интенсивно грибы разлагают древесину на среде с лесной почвой. Изучение разложения древесины на этой среде позволяет выделить в первом приближении грибы активно разрушающие валежную древесину. К ним можно отнести вешенку обыкновенную и пилолистник тигровый (рис. 4, табл. 3) [25].

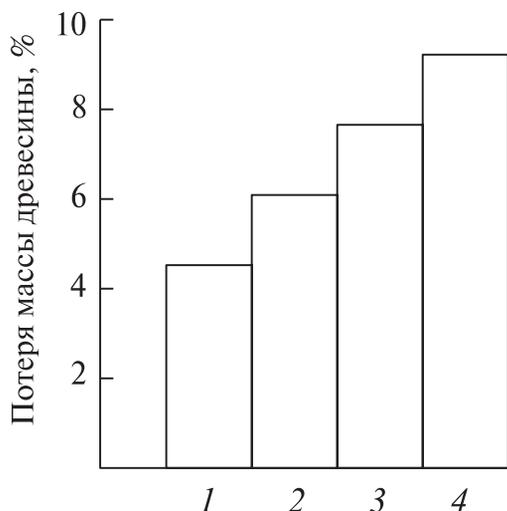
Дереворазрушающая активность грибов зависит от их минерального питания (рис. 5) [26].

Таблица 3

**Динамика разложения древесины березы грибами на среде с лесной почвой**

The dynamics of decomposition of birch wood by fungi in an environment with forest soil

Вид гриба	Длительность действия грибов на древесину, сут		
	60	120	180
Потеря массы древесины, %			
Вешенка обыкновенная ( <i>Pleurotus ostreatus</i> )	23,7	64,6	70,8
Пилолистник тигровый ( <i>Lentinus tigrinus</i> )	27,9	32,6	63,6



**Рис. 5.** Влияние элементов минерального питания на дереворазрушающую активность грибов белой гнили. Древесина пропитанная: 1 — дистиллированной водой; водными растворами: 2 —  $\text{FeSO}_4$ ; 3 —  $\text{KCl}$ ; 4 —  $\text{NaNO}_3$

**Fig. 5.** The influence of mineral nutrition elements on wood-destroying activity of white rot fungi. Impregnated wood: 1 — distilled water; aqueous solutions: 2 —  $\text{FeSO}_4$ ; 3 —  $\text{KCl}$ ; 4 —  $\text{NaNO}_3$

Очевидно, что наименее интенсивно грибы разрушают древесину, увлажненную только дистиллированной водой. Изучение распада древесины, увлажненной дистиллированной водой, позволяет в какой-то мере сделать заключение о скорости разложения сапрофитами сухостойной древесины.

Одним из важнейших минеральных источников питания для базидиальных дереворазрушающих грибов является азот ( $\text{NaNO}_3$ ). Дифференцированное внесение в среду минеральных соединений, показало, что дереворазрушающая активность штаммов *Coriolus versicolor* наиболее интенсивно повышается при внесении в среду нитрата натрия в качестве источника азота. Сульфатное питание ( $\text{FeSO}_4$ ) лишь незначительно повышает дереворазрушающую активность грибов. Более существенное влияние на их активность оказывает введение соединения калия ( $\text{KCl}$ ). Комбинированное внесение питательных веществ при искусственном заражении древостоя позволит эффективнее активизировать рост дереворазрушающих грибов в целях получения либо волокнистых полуфабрикатов, обогащенных целлюлозой, либо лигниновых препаратов с большим содержанием низкомолекулярных фенолов, либо плодовых тел грибов, содержащих биологически активные вещества [27].

## Выводы

1. Исследование микологически разрушенной древесины как потенциального химического сырья является перспективным направлением.

2. Разные классы фунгитоксичных соединений неодинаково влияют на активность грибов «бурой» и «белой гнили».

3. Дереворазрушающую активность грибов можно регулировать комбинированием минерального питания.

## Список литературы

- [1] Стороженко В.Г., Чеботарев П.А., Коткова В.М., Чеботарева В.В. Дереворазрушающие грибы и гнилевые фауны спелых и перестойных дубрав Теллермановского леса (Воронежская область) // Грибные сообщества лесных экосистем / Ред. В.Г. Стороженко. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2018. С. 106–117.
- [2] Митрофанова Н.А., Чураков Б.П., Загидуллина Л.И., Парамонова Т.А., Володина Ю.О. Анализ фитосанитарного состояния лесов Ульяновской области // Изв. Самарского научного центра Российской Академии наук, 2009. Т. 11. № 1 (3). С. 381–383.
- [3] Кононов Г.Н. Дендрохимия. Химия, нанохимия и биогеохимия компонентов клеток, тканей и органов древесных растений. М.: МГУЛ, 2015. Т. II. 632 с.
- [4] Global review of forest pests and diseases // Rome: FAO, 2009, 236 p.
- [5] Пятакин В.И., Салминен Э.О., Бит Ю.А. Лесозэксплуатация. М.: Академия, 2006. 320 с.
- [6] Беккер З.Э. Физиология и биохимия грибов. М.: МГУ, 1988. 230 с.
- [7] Костромина Е.О., Чхенкели В.А. Получение препаратов на основе дереворазрушающих грибов // Бюллетень ВСНЦ СО РАМН, 2014 № 6 (100). С. 48–51
- [8] Шиврина А.Н. Биологически активные вещества высших грибов. М.: Наука, 1965. 202 с.
- [9] Infectious Forest Diseases / Eds. P. Gonthier, G. Nicolotti. CABI, 2013, 616 p.
- [10] Хофрихтер Р. Таинственная жизнь грибов. М.: Колибри, 2019. 224 с.
- [11] Федоров Н.И. Лесная фитопатология. Минск: Вышэйшая школа, 1987. 180 с.
- [12] Рабинович М.Л., Болобова А.В., Кондращенко В.И. Теоретические основы биотехнологии древесных композитов. В 2-х кн. Кн. I. Древесина и разрушающие её грибы. М.: Наука, 2001. 264 с.
- [13] Бурова Л.Г. Формирование группировок макромицетов в культурах сосны разного возраста // Лесоведение, 1973. № 1. С. 38–45.
- [14] Стороженко В.Г., Бондарцева М.А., Соловьев В.А., Крутов В.И. Научные основы устойчивости лесов к дереворазрушающим грибам. М.: Наука, 1992. 222 с.
- [15] Степанова Н.Т., Мухин В.А. Основы экологии дереворазрушающих грибов. М.: Наука, 1979. 100 с.
- [16] Ганбаров Х.Г. Эколого-физиологические особенности дереворазрушающих высших грибов. Баку: ЭЛИМ, 1990. 197 с.
- [17] Бондарцев А.С. Трутовые грибы европейской части СССР и Кавказа. М.: Изд-во АН СССР, 1953. 1107 с.
- [18] Zhilin Zhanga, Ting Yangab, Na Mic, Yong Wanga, Guoyuan Li, Lihua Wanga, Yongjian Xie. Antifungal activity of monoterpenes against wood white-rot fungi // International Biodeterioration & Biodegradation, 2016, vol. 106, pp. 157–160.
- [19] Sumthong P., Romero-González R.R., Verpoorte R. Identification of Anti-Wood Rot Compounds in Teak (*Tectona grandis* L.f.) Sawdust Extract // J. Wood Chemistry and Technology, 2008, v. 28, pp. 247–260.

- [20] Valette N., Perrot T., Sormani R., Gelhaye E., Morel-Rouhier M. Antifungal activities of wood extractives // *Fungal Biology Reviews*, 2017, v. 31, no. 3, pp. 113–123.
- [21] Озолина Н.Р., Сергеева В.Н., Абрамович Ц.Л. Анатомические и химические изменения древесины березы пораженной грибами белой гнили // *Изв. АН Латвийской ССР*, 1987. № 12. С. 45–52.
- [22] Tapia C., Jimenez I., Medina J., Sapag-Hagar J., Gonzalez J., Gonzalez J. Evaluation of the Lignolytic Effect of the White-Rot Fungi *Ceriporiopsis* Sp, *Pleurotus* Sp, and *Phlebia* Sp on Industrial *Pinus Radiata* Logs // *J. Wood Chemistry and Technology*, 2005, v. 25, pp. 81–94.
- [23] Семенова И.Г., Соколова Э.С. *Фитопатология*. М.: Академия, 2003. 480 с.
- [24] Билай В.И. *Основы общей микологии*. Киев: Вища школа. 1980. 360 с.
- [25] Воронцов А.И. *Патология леса*. М.: Лесная пром-сть, 1978. 271 с.
- [26] Вакуров А.Д. Условия разрушения и сроки сохранности древесины в Северной тайге // *Лесной журнал*, 1974. № 17. С. 162–164.
- [27] Рипачек В. *Биология дереворазрушающих грибов*. М.: Лесная пром-сть, 1967. 258 с.

## Сведения об авторах

**Кононов Георгий Николаевич** — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), чл.-кор. РАЕН, ученый секретарь секции «Химия и химическая технология древесины» РХО им. Д.И. Менделеева, [kononov@mgul.ac.ru](mailto:kononov@mgul.ac.ru)

**Веревкин Алексей Николаевич** — канд. хим. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), [verevkin@mgul.ac.ru](mailto:verevkin@mgul.ac.ru)

**Сердюкова Юлия Владимировна** — ст. преподаватель МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), [caf-htdip@mgul.ac.ru](mailto:caf-htdip@mgul.ac.ru)

**Зайцев Владислав Дмитриевич** — аспирант МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), [kelertak@bk.ru](mailto:kelertak@bk.ru)

Поступила в редакцию 20.12.2019.

Принята к публикации 06.02.2020.

## WOOD MYCOLYSIS, ITS PRODUCTS AND THEIR USE

### I. ECOLOGICAL ASPECTS OF MYCOLOGICAL WOOD DESTRUCTION

**G.N. Kononov, A.N. Verevkin, Yu.V. Serdyukova, V.D. Zaitsev**

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

[kononov@mgul.ac.ru](mailto:kononov@mgul.ac.ru)

The article is devoted to the issues of ecology of wood mycolysis. The main types of xylophytes of coniferous and deciduous trees are considered. Information is given on the distribution of wood-destroying fungi belonging to various systematic groups of the main forest-forming species, and the duration of complete destruction of wood under their influence in the forests of the European part of Russia. The effect of fungicidal compounds of wood on the wood-destructive ability of xylophytes and the effect of mineral nutrition on their activity are analyzed. This article is the first in a series of mycolysis of wood, its products and their use in which it is planned to publish more parts of the articles: «II. Biological and morphological processes of mycological destruction of wood»; «III. Physiology and biochemistry of wood mycolysis»; «IV. Component composition of mycologically destroyed wood»; «V. «Brown rot» as a source of intermediates»; «VI. «White rot» of wood as a chemical raw material».

**Keywords:** basidiomycetes, xylophytes, wood-destroying mushrooms, mycolysis, wood rot

**Suggested citation:** Kononov G.N., Verevkin A.N., Serdyukova Yu.V., Zaitsev V.D. *Mikoliz drevesiny, ego produkty i ikh ispol'zovanie. I. Ekologicheskie aspekty mikologicheskogo razrusheniya drevesiny* [Wood mycolysis, its products and their use. I. Ecological aspects of mycological wood destruction]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 2, pp. 81–87. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-81-87

## References

- [1] Storozhenko V.G., Chebotarev P.A., Kotkova V.M., Chebotareva V.V. *Derevorazrushayushchie griby i gnilevye fauty spelykh i perestoynykh dubrav Tellermanovskogo lesa (Voronezhskaya oblast')* [Tree-destroying mushrooms and rotten fauts of ripe and overripe oak forests of the Tellerman Forest (Voronezh Region)]. *Gribnye soobshchestva lesnykh ekosistem* [Mushroom communities of forest ecosystems]. Ed. V.G. Storozhenko. Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2018, pp. 106–117.
- [2] Mitrofanova N.A., Churakov B.P., Zagidullina L.I., Paramonova T.A., Volodina Yu.O. *Analiz fitosanitarnogo sostoyaniya lesov Ul'yanovskoy oblasti* [Analysis of the phytosanitary condition of forests of the Ulyanovsk region]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy Akademii nauk* [Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2009, v. 11, no. 1 (3), pp. 381–383.

- [3] Kononov G.N. *Dendrokimiya. Khimiya, nanokhimiya i biogeokhimiya komponentov kletok, tkaney i organov drevesnykh rasteniy. V. 2.* [Dendrochemistry. Chemistry, nanochemistry and biogeochemistry of cell components, tissues and organs of woody plants. In 2 v. V. 2]. Moscow: MSFU, 2015, v. 2, 626 p.
- [4] Global review of forest pests and diseases. Rome: FAO, 2009, 236 p.
- [5] Patyakin V.I., Salminen E.O., Bit Yu.A. *Lesoekspluatatsiya* [Forest exploitation]. Moscow: Academy, 2006, 320 p.
- [6] Bekker Z.E. *Fiziologiya i biokhimiya gribov* [Physiology and biochemistry of mushrooms]. Moscow: MSU, 1988, 230 p.
- [7] Kostromina E.O., Chkhenkeli V.A. *Poluchenie preparatov na osnove derevorazrushayushchikh gribov* [Obtaining preparations based on wood-destroying mushrooms]. Byulleten' VSNTs SO RAMN [Bulletin of the All-Russian Scientific Research Center SB RAMS], 2014, no. 6 (100), pp. 48–51.
- [8] Shivrina A.N. *Biologicheski aktivnye veshchestva vysshikh gribov* [Biologically active substances of higher fungi]. Moscow: Science, 1965, 202 p.
- [9] Infectious Forest Diseases. Eds. P. Gonthier, G. Nicolotti. CABI, 2013, 616 p.
- [10] Khofrikhter R. *Tainstvennaya zhizn' gribov* [The mysterious life of mushrooms]. Moscow: Hummingbird, 2019, 224 p.
- [11] Fedorov N.I. *Lesnaya fitopatologiya* [Forest phytopathology]. Minsk: High School, 1987, 180 p.
- [12] Rabinovich M.L., Bolobova A.V., Kondrashchenko V.I. *Teoreticheskie osnovy biotekhnologii drevesnykh kompozitov. Kn. I. Drevesina i razrushayushchie ee griby* [Theoretical bases of biotechnology of wood composites. Book I: Wood and the fungi destroying it]. Moscow: Nauka, 2001, 264 p.
- [13] Burova L.G. *Formirovanie gruppirovok makromitsetov v kul'turakh sosny raznogo vozrasta* [The formation of macromycete groups in pine crops of different ages]. *Lesovedenie* [Forestry], 1973, no. 1, pp. 38–45.
- [14] Storozhenko V.G., Bondartseva M.A., Solov'ev V.A., Krutov V.I. *Nauchnye osnovy ustoychivosti lesov k derevorazrushayushchim gribam* [The scientific basis of the resistance of forests to wood-destroying fungi]. Moscow: Science, 1992, 222 p.
- [15] Stepanova N.T., Mukhin V.A. *Osnovy ekologii derevorazrushayushchikh gribov* [Fundamentals of ecology of wood-destroying mushrooms]. Moscow: Science, 1979, 100 p.
- [16] Ganbarov Kh.G. *Ekologo-fziologicheskie osobennosti derevorazrushayushchikh vysshikh gribov*. [Ekologophysiological features of higher basically wood-destroying fungi]. Baku: ELM, 1989, 197 p.
- [17] Bondartsev A.S. *Trutovye griby evropeyskoy chasti SSSR i Kavkaza* [Pipe mushrooms in the European part of the USSR and the Caucasus]. Moscow: Publishing house of the Academy of Sciences of the USSR, 1953, 1107 p.
- [18] Zhilin Zhanga, Ting Yangab, Na Mic, Yong Wanga, Guoyuan Li, Lihua Wanga, Yongjian Xiec. Antifungal activity of monoterpenes against wood white-rot fungi. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2016, v. 106, pp. 157–160.
- [19] Sumthong P., Romero-González R.R., Verpoorte R. Identification of Anti-Wood Rot Compounds in Teak (*Tectonagrandis* L.f.) Sawdust Extract. *J. Wood Chemistry and Technology*, 2008, v. 28, pp. 247–260.
- [20] Valette N., Perrot T., Sormani R., Gelhaye E., Morel-Rouhier M. Antifungal activities of wood extractives. *Fungal Biology Reviews*, 2017, v. 31, no. 3, pp. 113–123.
- [21] Ozolinya N.R., Sergeeva V.N., Abramovich Ts.L. *Anatomicheskie i khimicheskie izmeneniya drevesiny berezy porazhennoy gribami beloy gnili* [Anatomical and chemical changes in birch wood affected by white rot fungi]. *Izv. AN Latvviyskoy SSR* [Proceedings of the Academy of Sciences of the Latvian SSR], 1987, no. 12, pp. 45–52.
- [22] Tapia C., Jimenez I., Medina J., Sapag-Hagar J., Gonzalez J., Gonzalez J. Evaluation of the Lignolytic Effect of the White-Rot Fungi *Ceriporiopsis* Sp, *Pleurotus* Sp, and *Phlebia* Sp on Industrial *Pinus Radiata* Logs. *J. Wood Chemistry and Technology*, 2005, v. 25, pp. 81–94.
- [23] Semenkova I.G., Sokolova E.S. *Fitopatologiya* [Plant pathology]. Moscow: Academy, 2003, 480 p.
- [24] Bilay V.I. *Osnovy obshchey mikologii* [Fundamentals of General Mycology]. Kiev: Vishcha shkola [High School], 1980, 360 p.
- [25] Vorontsov A.I. *Patologiya lesa* [Forest pathology]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest industry], 1978, 271 p.
- [26] Vakurov A.D. *Usloviya razrusheniya i sroki sokhrannosti drevesiny v Severnoy tayge* [Destruction conditions and shelf life of wood in the Northern taiga]. *Lesnoy zhurnal* [Forest Journal], 1974, no. 17, pp. 162–164.
- [27] Ripachek V. *Biologiya derevorazrushayushchikh gribov* [Biology of wood-destroying fungi]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest industry], 1967, 258 p.

## Authors' information

**Kononov Georgiy Nikolaevich** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), corresponding member of the Russian Academy of Natural Sciences, the scientific secretary of section «Chemistry and engineering chemistry of wood» RHO of D.I. Mendeleev, kononov@mgul.ac.ru

**Verevkin Aleksey Nikolaevich** — Cand. Sci. (Chemical), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), verevkin@mgul.ac.ru

**Serdyukova Yuliya Vladimirovna** — Senior Lecturer of BMSTU (Mytishchi branch), caf-htdip@mgul.ac

**Zaytsev Vladislav Dmitrievich** — Pg. BMSTU (Mytishchi branch), kelertak@bk.ru

Received 20.12.2019.

Accepted for publication 06.02.2020.

УДК 676.163.4

DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-88-97

## МОЛОДАЯ ТОНКОМЕРНАЯ ДРЕВЕСИНА ОТ РУБОК УХОДА ЗА ЛЕСОМ — РЕЗЕРВ СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЦЕЛЛЮЛОЗЫ И БУМАГИ

Ф.Х. Хакимова, К.А. Синяев, Р.Р. Хакимов, О.А. Носкова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29  
oa-noskova@mail.ru

Рассмотрено повышение комплексности использования древесного сырья — одного из важнейших направлений рационального природопользования и охраны окружающей среды, поскольку замена спелой древесины на молодую тонкомерную от рубок ухода за лесом имеет экономическое и экологическое значение. Исследована возможность и целесообразность бисульфитной варки (делигнификации) молодой древесины ели, сосны, березы от рубок ухода за лесом по сравнению со спелой древесиной. Определены оптимальные режимы бисульфитной делигнификации молодой древесины ели, сосны и березы, позволяющие получить целлюлозу с высокими показателями механической прочности. Показано, что целлюлоза из молодой древесины размалывается легче и имеет более высокие показатели механической прочности, чем из спелой; однако целлюлоза из молодой древесины обезвоживается несколько труднее и обладает повышенной водоудерживающей способностью, а рассортировка тонкомерной молодой древесины, заготовленной при рубках ухода, трудоемка и не всегда желательна. Установлена возможность бисульфитной делигнификации технологической щепы из смеси различных пород тонкомерной древесины. Построены диаграммы «породный состав щепы — свойства целлюлозы», которые позволяют прогнозировать бумагообразующие свойства полученной целлюлозы при известном составе древесного сырья. Выявлена возможность добавок в количестве 10...20 % молодой древесины ели, березы и сосны при традиционных бисульфитных варках балансовой еловой древесины, что не вызывает затруднений процесса варки и не снижает качество получаемой целлюлозы.

**Ключевые слова:** тонкомерная древесина, рубки ухода, бисульфитная варка, целлюлоза, показатели качества, варка смеси пород древесины, варки спелой древесины с добавками молодой

**Ссылка для цитирования:** Хакимова Ф.Х., Синяев К.А., Хакимов Р.Р., Носкова О.А. Молодая тонкомерная древесина от рубок ухода за лесом — резерв сырья для производства целлюлозы и бумаги // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 2. С. 88–97. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-88-97

Одним из направлений развития химической переработки древесины с получением полуфабрикатов для производства бумаги и картона является комплексное использование древесного сырья, в том числе максимальное вовлечение в переработку некондиционной древесины.

Целлюлозно-бумажная промышленность России, особенно предприятия на ее европейской части, где запасы древесины ограничены, все больше сталкивается с проблемой обеспеченности сырьем. Доставка его из лесодостаточных районов экономически нецелесообразна.

Для снижения и устранения образовавшегося дефицита сырья предлагается проведение следующих мер: снижение требований к диаметру древесины; полное использование лесосечных отходов, отходов лесопиления и деревообработки; создание плантаций быстрорастущих пород древесины и т. д.

Одним из резервов сырья для целлюлозно-бумажной промышленности может служить молодая тонкомерная древесина, получаемая при проведении рубок ухода за лесом (при осветлении, прочистке, прореживании, т. е. в возрасте 10...30 лет). Ресурсы такой древесины настолько велики, что могут значительно покрыть возрастающие потребности отрасли в сырье [1, 2].

При известных способах переработки древесного сырья в целом по России используется около половины биомассы дерева [3].

Особенности морфологического строения молодой тонкомерной древесины, различия плотности и химического состава по сравнению со спелой обуславливают необходимость комплексного исследования ее делигнификации [4].

Основное внимание исследователей в последние годы было обращено на сульфатный способ делигнификации некондиционной древесины как наиболее универсальный, позволяющий использовать низкокачественное сырье. Однако в структуре целлюлозного производства России на долю сульфитной целлюлозы (по варке) приходится до 30 % (такая целлюлоза выпускается на 19 предприятиях России). Быстрое перефильтрация или вывод из баланса отрасли этих производственных мощностей в ближайшие годы невозможно, поэтому в российской целлюлозно-бумажной промышленности и в будущем сохранится крупнотоннажное производство сульфитной (бисульфитной) целлюлозы, в связи с чем представляет интерес производство беленого полуфабриката из молодой тонкомерной древесины разных пород. Существенным преимуществом сульфитного метода варки по сравнению с полу-

чившим широкое распространение за последние годы сульфатным методом является более полное использование древесины — более высокий выход целлюлозы, а также ее легкая белимость [1, 2, 5].

Заготовка тонкомерной древесины — довольно трудоемкая операция. Предприятия, начавшие переработку тонкомерной древесины, столкнулись с необходимостью создания нового оборудования для ее заготовки. Предприятия США, которые одними из первых начали заготовку и переработку тонкомерной древесины, применили для этого имеющиеся окорочные барабаны и рубительные машины. Производительность окорочных барабанов при окорке тонкомера снизилась в 2 раза. В то же время была получена щепа хорошего качества. Во Франции создана специальная окорочная машина для тонкомерной древесины [6].

Работы по созданию и практическому применению комплексных высокомеханизированных установок ведутся во многих странах с развитой целлюлозно-бумажной промышленностью. Например, в связи с потреблением в США больших количеств тонкомерной древесины сосны (возрастом 10...12 лет, при диаметре ствола 10...18 см) рекомендован рациональный высокоэффективный способ ее лесозаготовки [7, 8].

Современным требованием рационального природопользования и охраны окружающей среды является комплексное использование древесного сырья, одним из путей которого является активизация работы лесоперерабатывающих отраслей в направлении ресурсосбережения с помощью максимальной утилизации отходов лесозаготовки и переработки древесного сырья [4, 9, 10].

Замена спелой древесины на молодую тонкомерную древесину от рубок ухода за лесом имеет и экономическое, и экологическое значение [9–11].

Лабораторные испытания, а затем и опытно-промышленные выработки сульфатной целлюлозы из молодой древесины хвойных и лиственных пород подтвердили целесообразность использования такого сырья в качестве добавки к обычной балансовой древесине для получения технической целлюлозы [12]. Однако в России до 30 % целлюлозы вырабатывается сульфитным способом, поэтому интерес представляет изучение возможности использования древесины рубок ухода для получения сульфитной и бисульфитной целлюлозы, пригодной для производства бумаги.

Наиболее часто для производства бисульфитной целлюлозы в нашей стране применяется древесина ели, пихты, осины, березы. При проведении рубок ухода за лесом — прореживании — получают также тонкомерную древесину указанных пород, преимущественно березы, а так как лиственные породы древесины по свойствам,

морфологии и химическому составу значительно отличаются от хвойных, то интерес представляет изучение бисульфитной делигнификации молодой древесины березы по сравнению с ее спелой древесиной в сопоставлении с еловой [12].

## Цель работы

Цель работы — исследование возможности и целесообразности бисульфитной варки (делигнификации) молодой древесины ели, сосны, березы от рубок ухода за лесом по сравнению со спелой древесиной.

## Материалы и методы исследования

Для исследований использовали древесину ели, сосны, березы, заготовленную при проведении рубок прореживания в Нижне-Кузьинском лесничестве Пермской обл. Заготовленные деревья соответствовали термину «тонкомерная древесина», поскольку их диаметр на пне составлял 6...12 см. Средний возраст отобранной древесины 20...30 лет, т. е. это — молодая древесина. В связи с этим понятия «тонкомерная древесина» и «молодая древесина» в настоящей работе идентичны. Одновременно заготовили и балансовую древесину (возрастом 70...85 лет) соответствующих пород.

Молодая тонкомерная древесина по сравнению со спелой имеет пониженную плотность, более короткие и узкие волокна и меньшую толщину клеточной оболочки [13] (табл. 1).

Древесина молодая тонкомерная всех сравниваемых пород отличается от спелой меньшим содержанием целлюлозы, по Кюршнеру, смол и жиров, но повышенным содержанием лигнина, пентозанов и веществ, экстрагируемых горячей водой.

Особого внимания заслуживает древесина сосны, которая в сульфитцеллюлозном производстве не используется, поскольку ядровая часть сосны, в отличие от заболонной, нормально не варится по сульфитному способу. Тормозящее действие на процесс варки оказывают смолистые вещества (фенолы), которые вступают в реакции конденсации с лигнином [14, 15].

У молодой древесины сосны, получаемой при рубках ухода (возрастом 20...25 лет), размер ядра незначителен, такая древесина содержит меньшее количество смолистых веществ, чем спелая, поэтому сульфитным способом варится без затруднений [14]. Бисульфитным способом можно варить и сосну, содержащую фенолы [15].

В настоящее время на большинстве сульфитцеллюлозных заводов используют варочную кислоту, по составу близкую к варочному раствору для бисульфитной варки целлюлозы. Однако варочный раствор не является чисто бисульфитным,

## Физические свойства и химический состав древесины

## Physical properties and chemical composition of wood

Показатели	Ель		Сосна		Береза	
	Молодая	Спелая	Молодая	Спелая	Молодая	Спелая
Диаметр на пне, см:						
с корой	5,9	24,8	8,4	27,2	6,8	27,6
без коры	5,6	22,5	8,1	24,5	6,5	26,0
Средневзвешенная плотность, кг/м <sup>3</sup>	377	397	370	410	540	560
Массовая доля в древесине, %:						
целлюлозы (по Кюршнеру)	52,3	54,7	51,1	52,5	46,0	48,0
лигнина (по Комарову)	29,4	28,2	31,5	30,6	23,5	22,9
пентозанов	10,2	8,3	9,9	6,6	26,6	25,8
веществ, экстрагируемых горячей водой (90° С)	3,1	2,3	3,0	2,7	2,6	2,4
смола и жиров	1,9	2,3	2,9	4,4	2,3	2,5

в нем всегда есть некоторое количество растворенного диоксида серы (SO<sub>2</sub>). Исходя из этого для исследований использовали варочную кислоту на натриевом основании следующего состава: 3,8...4,0 % всего SO<sub>2</sub>; 1,75...1,80 % связанного SO<sub>2</sub>; pH = 2,5...2,6.

Бисульфитные варки проводили в стационарном автоклаве вместимостью 2 л с электрообогревом без принудительной циркуляции. Гидромодуль составил 5:1. Полученную целлюлозу распускали на волокна в дезинтеграторе, промывали струей водопроводной воды и сортировали.

Для достижения наилучших результатов варки молодой древесины указанных пород были поставлены эксперименты с последующей оптимизацией по показателям, характеризующим в основном результаты варки и качество целлюлозы: выходу от исходного сырья; степени провара; разрывной длине целлюлозы. Эксперименты были поставлены по плану Бокса для  $m = 3$  переменных факторов: конечной температуры варки, продолжительности подъема температуры до конечной; продолжительности варки на конечной температуре.

В работе использовали следующие стандартные методы анализа целлюлозы: определение массовой доли влаги по ГОСТ 16932; степени провара (перманганатным методом) по ГОСТ 9109; массовой доли лигнина в целлюлозе по ГОСТ 11960; экстрактивных веществ (смола и жиров) по ГОСТ 6841; пентозанов по ГОСТ 10820; белизны по ГОСТ 7690.

Определяли показатели механической прочности целлюлозы: сопротивления разрыву по ГОСТ 1924–1–96; прочности на излом при многократных перегибах по ГОСТ 13525.2; сопротивления продавливанию по ГОСТ 13525.8.

Показатели механической прочности отливок целлюлозы определяли после размола в мельнице

ЦРА до степени помола 60 градусов Шоппер-Риглера (°ШР). Степень помола массы определяли на аппарате СР-2. Образцы бумаги с массой 75 г/м<sup>2</sup> получали на листоотливном аппарате ЛА-2 с вакуум-сушильной камерой.

Подготовку образцов к испытаниям (кондиционирование) проводили согласно ГОСТ 13523.

Водоудержание целлюлозы определяли по усовершенствованному методу Джайме [16].

## Результаты и обсуждение

Как было указано выше, в процессе исследования варок молодой древесины различных пород поставлены эксперименты по плану Бокса с последующей оптимизацией процессов.

В результате проведения экспериментов получены уравнения регрессии второго порядка по каждому из указанных выше показателей [17].

Оптимизация процесса делигнификации заключалась в получении максимального выхода целлюлозы при ограничениях по:

*степени провара, п.е.*

для еловой целлюлозы .....  $У_{с.п.} \leq 110$

для березовой целлюлозы .....  $У_{с.п.} \leq 100$

для сосновой целлюлозы .....  $У_{с.п.} \leq 110$

*разрывной длине, м*

для еловой целлюлозы .....  $У_{р.д.} \geq 8000$

для березовой целлюлозы .....  $У_{р.д.} \geq 7400$

для сосновой целлюлозы .....  $У_{р.д.} \geq 8000$

В качестве целевых функций приняты выход целлюлозы, степень провара и разрывная длина.

В соответствии с указанными исходными данными оптимизации были получены условия варки (табл. 2).

По полученным в результате оптимизации режимам проведены сравнительные варки молодой и спелой древесины ели, березы и сосны, (табл. 3).

Из тонкомерных образцов древесины получена целлюлоза с показателями, соответствующими в основном расчетным. Данные сравнительных варок молодой и спелой древесины показали, что полученные образцы целлюлозы различаются по степени провара, выходу как общему, так и отсортированной массы. Целлюлоза из тонкомерной древесины ели имеет несколько повышенное содержание сучков по сравнению с целлюлозой из спелой древесины; содержание смол и жиров в сравниваемых целлюлозах практически не различается, целлюлоза из тонкомерной ели имеет несколько повышенную долю пентозанов.

Образцы целлюлозы из молодой и спелой ели имеют высокие показатели механической прочности, которые выше у образца из молодой древесины. Целлюлоза из тонкомерной ели отличается повышенным значением водоудержания и, соответственно, более медленной обезвоживаемостью, но легче размалывается.

Сравнивая результаты варок березовой древесины следует отметить, что целлюлоза из молодой тонкомерной березы имеет пониженный выход и большую долю сучков в образце. Такая целлюлоза содержит больше остаточного лигнина и пентозанов, но меньше смол и жиров по сравнению с образцом из спелой березы. Показатели механической прочности целлюлозы из молодой тонкомерной древесины выше, чем показатели целлюлозы из спелой березы. Полученные целлюлозы различаются по белизне: данный пока-

Т а б л и ц а 2  
Оптимальные условия варки  
молодой древесины  
Optimal cooking conditions for young wood

Переменный фактор	Ель	Береза	Сосна
Конечная температура варки, °С	147	142	152
Продолжительность подъема температуры до конечной, мин	100	90	100
Продолжительность варки при конечной температуре, мин	90	80	100

затель выше у образца из тонкомерной березы (на 10 %).

Образцы лиственной целлюлозы, аналогично еловой целлюлозе, различаются также по степени обезвоживаемости, водоудержанию и продолжительности размола до 60° ШР. Хуже обезвоживается и более высокое значение водоудержания имеет целлюлоза из тонкомерной березы, этот образец значительно быстрее размалывается.

Следовательно, тонкомерная береза, как и ель, делигнифицируется несколько труднее, чем спелая, и полученная целлюлоза отличается от целлюлозы из спелой березы пониженным выходом и более высокими показателями механической прочности.

Из тонкомерной сосны возможно получение бисульфитной целлюлозы с показателями, соответствующими в основном расчетным (см. табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Результаты сравнительных варок тонкомерной  
и спелой древесины по разработанным режимам

Results of comparative tests of thin and ripe wood according to the developed modes

Показатель целлюлозы	Ель		Береза		Сосна	
	1	2	1	2	1	2
Степень провара, п.е.	110	100	96	91	110	126
Выход, % исходной древесины: общий сортированной массы сучков, непровара	53,5	52,2	53,8	54,9	55,3	56,4
	52,3	52,0	52,1	54,9	51,1	49,8
	1,2	0,2	1,7	–	4,2	6,6
Массовая доля в целлюлозе, % : лигнина пентозанов смол и жиров	4,0	3,4	3,7	3,2	4,2	6,0
	5,8	5,2	14,2	12,6	9,6	7,4
	1,5	1,3	2,2	2,6	1,8	2,4
Механическая прочность (75 г/м <sup>2</sup> , 60° ШР): разрывная длина, м сопротивление продавливанию, кПа сопротивление излому, ч.д.п.	8820	8600	7860	7500	8740	8700
	480	460	420	370	510	500
	2290	2470	1020	1250	2360	2080
Белизна, %	67,0	65,0	64,0	54,0	66,0	64,0
Обезвоживаемость при 25° ШР, с	17	14	18	16	17	15
Водоудерживающая способность при 25° ШР, %	200	160	280	250	210	170
Продолжительность размола до 60° ШР, мин	52	57	35	45	60	65
<i>Примечание.</i> 1 — тонкомерная древесина, 2 — спелая древесина.						

Целлюлоза из тонкомерной древесины отличается от целлюлозы из балансовой сосны меньшим количеством непровара (в целлюлозе из тонкомерной древесины основная часть непровара — сучки), более низким содержанием остаточного лигнина, смол и жиров, повышенным содержанием пентозанов. Различаются сравниваемые целлюлозы по степени провара, труднее проваривается спелая сосна. Механическая прочность полученных целлюлоз очень высокая и находится примерно на одинаковом уровне. Следовательно, из тонкомерной сосны бисульфитным способом можно получить целлюлозу достаточно хорошей степени провара с высокими прочностными показателями.

Таким образом, молодая древесина делигнифицируется бисульфитным варочным раствором без затруднений, но несколько медленнее по сравнению с соответствующей породой спелой древесины. Молодая древесина сосны, содержащая меньшее количество смолистых веществ, чем спелая, делигнифицируется легче балансовой древесины сосны и может быть использована для получения бисульфитной целлюлозы.

Целлюлоза из молодой древесины размалывается легче и имеет более высокие показатели механической прочности, чем из спелой; однако целлюлоза из молодой древесины обезвоживается несколько труднее и обладает повышенной вододерживающей способностью.

По данным работ [18, 19], зарубежный опыт и отечественные исследования показали достаточную реальность использования тонкомерной древесины ели и березы в производстве беленой целлюлозы и культурных видов бумаги.

Рассортировка тонкомерной молодой древесины, заготовленной при рубках ухода, трудоемка и не всегда желательна. Поэтому важным является вопрос совместной сульфитной (бисульфитной) варки молодой древесины различных пород.

Определено влияние породного состава сырья из молодой древесины (ели, сосны, березы) на свойства бисульфитной целлюлозы. Для изучения свойств данной трехкомпонентной смеси был принят план Шеффе третьего порядка — симплекс-решетчатый план ( $q = 3, d = 3$ ) [17]. В качестве переменных факторов были приняты доли еловой ( $X_1$ ), сосновой ( $X_2$ ), и березовой ( $X_3$ ) фракций в древесном сырье. Свойства получаемой бисульфитной целлюлозы оценивали по следующим параметрам:  $y_1$  — выход целлюлозы, %;  $y_2$  — степень провара, п.е.;  $y_3$  — разрывная длина, м;  $y_4$  — сопротивление продавливанию, кПа.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что наибольшее влияние на выход и степень провара целлюлозы оказывает доля сосновой древесины в исходном сырье,

а на механическую прочность — доля тонкомерной ели.

Зависимость свойств бисульфитной целлюлозы от породного состава исходного древесного сырья наглядно представляют диаграммы «породный состав древесного сырья — выход целлюлозы» и «породный состав — разрывная длина» (рис. 1, 2).

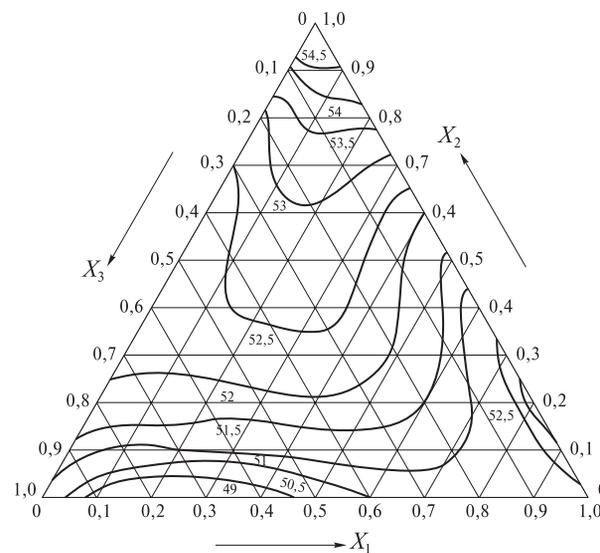


Рис. 1. Диаграмма зависимости выхода бисульфитной целлюлозы от породного состава исходного сырья:  $X_1$  — ель;  $X_2$  — сосна;  $X_3$  — береза

Fig. 1. A diagram of the dependence of bisulfite cellulose yield on the species composition of the feedstock:  $X_1$  — spruce;  $X_2$  — pine;  $X_3$  — birch

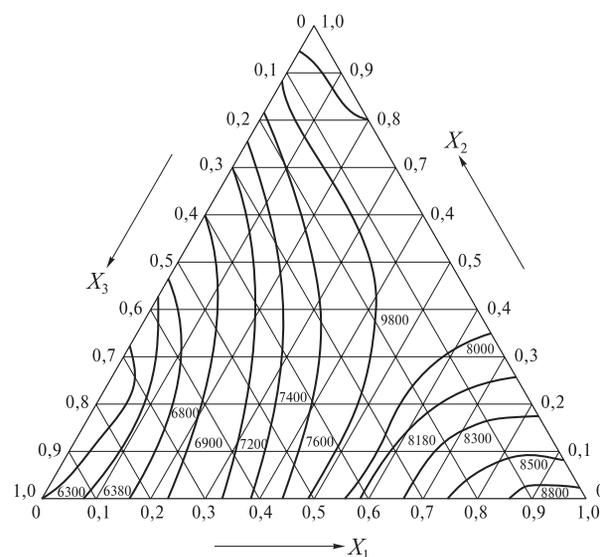


Рис. 2. Диаграмма зависимости механической прочности (разрывной длины) бисульфитной целлюлозы от породного состава исходного сырья:  $X_1$  — ель;  $X_2$  — сосна;  $X_3$  — береза

Fig. 2. Diagram of the dependence of the mechanical strength (breaking length) of bisulfite cellulose on the rock composition of the feedstock:  $X_1$  — spruce;  $X_2$  — pine;  $X_3$  — birch

Т а б л и ц а 4

**Влияние добавки молодой тонкомерной древесины ели, сосны и березы  
на результаты бисульфитной варки древесины спелой ели**

**The effect of adding young fine spruce, pine and birch wood on the results of bisulfite cooking of ripe spruce wood**

Параметры	Состав исходного древесного сырья, %															
	100	90	80	70	60	–	90	80	70	60	–	90	80	70	60	–
Порода древесины:																
ель спелая	100	90	80	70	60	–	90	80	70	60	–	90	80	70	60	–
ель молодая	–	10	20	30	40	100	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
сосна молодая	–	–	–	–	–	–	10	20	30	40	100	–	–	–	–	–
береза молодая	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	10	20	30	40	100
Выход целлюлозы, % исходной древесины:																
общий	52,4	52,6	51,9	52,1	52,8	51,2	52,8	54,0	54,7	54,6	55,3	52,2	52,0	51,4	51,0	51,2
отсортированная древесина	51,1	51,4	50,3	51,0	50,6	50,6	51,6	50,4	50,5	48,8	50,1	50,9	51,3	50,3	50,5	50,0
Механические характеристики:																
разрывная длина, м	8040	8210	8450	8570	8660	8670	7900	8110	8170	8130	8090	8230	8130	7950	7260	7050
сопротивление продавливанию, кПа	400	410	430	430	470	460	380	380	480	470	460	410	400	410	360	340
сопротивление излому, ч.д.п.	2100	2090	2280	2080	2560	2390	2120	2210	2300	2380	2320	2160	1840	1690	1470	1360

Представленные диаграммы подтверждают выводы, сделанные на основании расчетов. По полученным диаграммам можно предсказать направление изменения свойств бисульфитной целлюлозы из молодой древесины (выхода, механической прочности) при известном составе исходного древесного сырья. Возможен и другой вариант использования диаграмм — при определенных требованиях к свойствам бисульфитной целлюлозы можно выбрать оптимальный породный состав исходного сырья.

Одним из вариантов использования молодой тонкомерной древесины в целлюлозно-бумажной промышленности является применение ее в качестве добавки при варке балансовой древесины. Авторы работ [20, 21] показали целесообразность добавок щепы из тонкомерной древесины различных пород к производственной щепе из сосновой древесины при получении сульфатной целлюлозы.

Для изучения влияния добавок тонкомерной древесины на свойства бисульфитной целлюлозы из еловой древесины использовали молодую древесину ели, сосны и березы. Доля добавки тонкомерной древесины к балансовой составляла от 10 до 40 %.

Варки проводили по одинаковому режиму при конечной температуре 150 °С, т. е. при температуре, применяемой на большинстве целлюлозных заводов при варке бисульфитной целлюлозы (табл. 4, рис. 3–5).

Поскольку молодая тонкомерная древесина делигнифицируется медленнее, чем спелая, то и влияние ее добавок при варке спелой древесины скажется, вероятно, на скорости процесса варки. Добавка 20 % тонкомерной ели к спелой практически не сказалась на результатах варки, но дальнейшее увеличение доли тонкомерной древесины в исходном сырье несколько затрудняет процесс делигнификации, т. е. получается более жесткая целлюлоза, особенно при добавке 40 % тонкомерной древесины. В соответствии с изменением степени провара изменяется и выход целлюлозы. С увеличением в смеси доли тонкомерной древесины повышаются все показатели механической прочности целлюлозы (см. табл. 4, рис. 3).

Ранее было показано, что тонкомерная молодая древесина сосны, в отличие от спелой, может быть использована в качестве сырья для производства бисульфитной целлюлозы. Представляет интерес и возможность использования этой древесины в качестве добавки при бисульфитной варке балансовой ели.

Добавка 10 % тонкомерной сосны не оказывает существенного влияния на результаты варки — выход, степень провара и прочностные показатели целлюлозы получены на уровне соответствующих показателей при варке только ели. С увеличением доли сосны несколько повышается общий выход древесного остатка вследствие меньшей степени ее делигнификации, выход отсортированной целлюлозы уменьшается, а доля

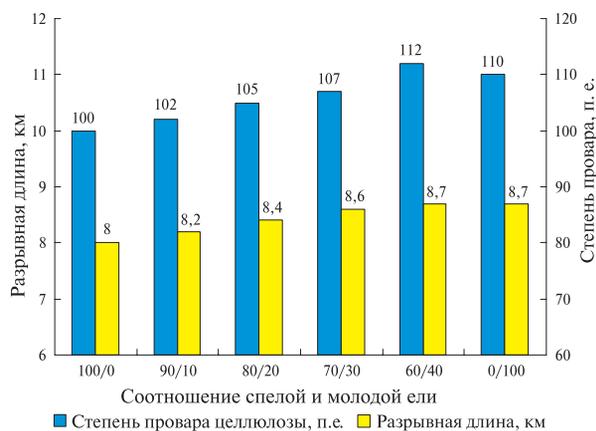


Рис. 3. Влияние добавки древесины молодой тонкомерной ели на результаты бисульфитной варки древесины спелой ели

Fig. 3. The effect of wood additives of young fine-sized spruce on the results of bisulfite pulping of ripe spruce wood

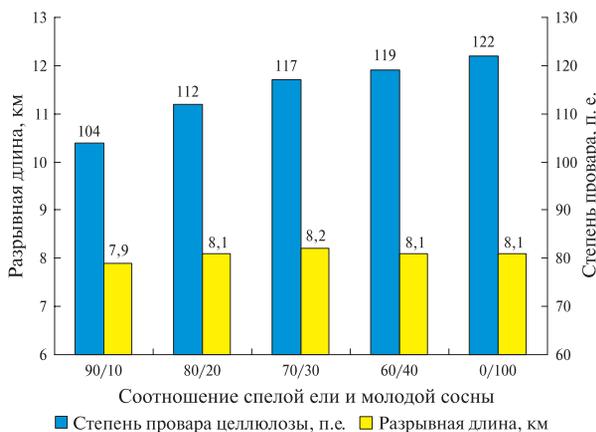


Рис. 4. Влияние добавки древесины молодой тонкомерной сосны на результаты бисульфитной варки древесины спелой ели

Fig. 4. The effect of the additives of young pine wood on the results of bisulfite pulping of ripe spruce wood

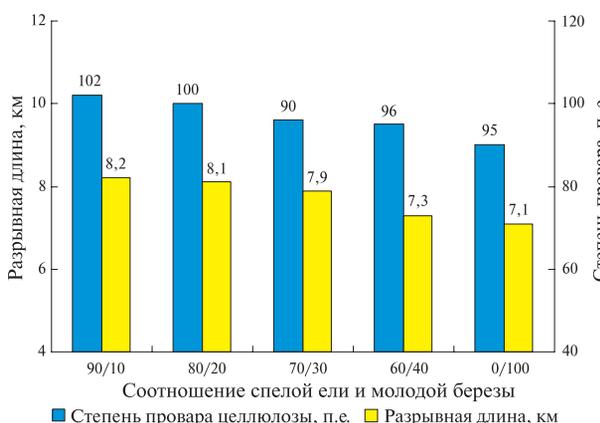


Рис. 5. Влияние добавки древесины молодой тонкомерной березы на результаты бисульфитной варки древесины спелой ели

Fig. 5. The effect of the addition of young birch wood on the results of bisulfite pulping of ripe spruce wood

сучков и непровара возрастает. По прочностным показателям полученные образцы целлюлозы различаются незначительно (см. табл. 4, рис. 4).

Считается, что одной из основных пород древесины, удаляемых при рубках прореживания, является береза. Обычно лиственная древесина, в том числе и спелая березовая, при сульфитной варке делигнифицируется легче, чем древесина ели, что приводит к перевару лиственной целлюлозы при совместной варке древесины хвойных и лиственных пород. Поскольку древесина молодой тонкомерной березы делигнифицируется медленнее, чем спелая, было бы целесообразно использовать ее в качестве добавки при сульфитных (бисульфитных) варках балансовой ели.

Результаты бисульфитных варок смесей древесины спелой ели и молодой березы в различных соотношениях показывает, что добавка 10...20 % тонкомерной березы практически не влияет на выход и качественные показатели целлюлозы, т. е. они соответствуют аналогичным показателям целлюлозы из 100 % ели. С увеличением доли березы в смеси наблюдаются некоторое повышение степени делигнификации целлюлозы (уменьшение жесткости, что связано с более легкой делигнификацией березовой древесины по сравнению с хвойной), незначительное снижение выхода целлюлозы в соответствии со степенью делигнификации, а также снижение показателей механической прочности (см. табл. 4, рис. 5).

Таким образом, анализ полученных результатов показал, что добавка 10...20 % тонкомерной древесины ели, сосны и березы к балансовой ели при бисульфитной варке не ухудшает результаты варки.

### Выводы

1. Молодая древесина делигнифицируется бисульфитным варочным раствором без затруднений, но несколько медленнее по сравнению с соответствующей породой спелой древесины. Молодая древесина сосны, содержащая меньшее количество смолистых веществ, чем спелая, делигнифицируется легче балансовой древесины сосны и может быть использована для получения бисульфитной целлюлозы.

2. Определены оптимальные режимы бисульфитной делигнификации молодой древесины ели, сосны и березы, позволяющие получить из этих пород древесины целлюлозу с высокими показателями механической прочности при определенных значениях выхода и степени делигнификации.

3. Установлена возможность бисульфитной делигнификации технологической щепы из смеси различных пород тонкомерной древесины. Построенные диаграммы «породный состав

щепы — свойства целлюлозы» позволяют прогнозировать бумагообразующие свойства полученной целлюлозы при известном составе древесного сырья.

4. Показана возможность добавок 10...20 % молодой древесины ели, березы и сосны при традиционных бисульфитных варках балансовой еловой древесины, что не вызывает затруднений процесса варки и не снижает качество получаемой целлюлозы.

5. Целлюлоза из молодой древесины размалывается легче и имеет более высокие показатели механической прочности, чем из спелой. Однако целлюлоза из молодой древесины обезвоживается несколько труднее и обладает повышенной вододерживающей способностью.

## Список литературы

- [1] Гелес И.С. Древесное сырье — стратегическая основа и резерв цивилизации. Петрозаводск: Ин-т леса КарНЦ РАН, 2007. 499 с.
- [2] Гелес И.С., Коржицкая З.А. Биомасса дерева и ее использование. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1992. 230 с.
- [3] Беловежец Л.А., Волчатова И.В., Медведева С.А. Перспективные способы переработки вторичного лигно-целлюлозного сырья // Химия растительного сырья, 2010. № 2. С. 5–16.
- [4] Ковернинский И.Н., Комаров В.И., Третьяков С.И., Богданович Н.И., Соколов О.М., Кутакова Н.А., Селянина Л.И. Комплексная химическая переработка древесины. Архангельск: АГТУ, 2003. 344 с.
- [5] Непенин Ю.Н., Жалина В.А. Тонкомерная древесина как сырье для целлюлозно-бумажной промышленности // Древесное сырье и возможности его комплексного использования / Ред. И.С. Гелес. Петрозаводск: КФ АН СССР, 1983. С. 101–108.
- [6] Молотков Л.К. Использование в ЦБП отходов древесины лесозаготовок и от рубок ухода за лесом. М.: ВНИПИЭИлеспром, 1987. 41 с.
- [7] Holekamp James A. The efficient harvest, transport and milliard process of smallwood pine // AIChE Symp Ser., 1980, v. 76, no. 195, pp. 12–19.
- [8] McCormack R. A mechanized harvesting system for Pinus radiata thinnings // Appita, 1979, v. 32, no. 4, pp. 291–294.
- [9] Пен Р.З., Рязанова Т.В. Комплексная химическая переработка древесины. Красноярск: СибГТУ, 2012. 158 с.
- [10] Андреева А.А. Ресурсосбережение и использование отходов заготовки и переработки древесного сырья // Фундаментальные и прикладные исследования проблемы и результаты, 2014. № 10. С. 148–155.
- [11] Судакова И.Г., Руденко Н.Б. Получение твердых биотоплив из растительных отходов (обзор) // Журнал Сибирского федерального университета. Химия, 2015. Т. 8. № 4. С. 499–513.
- [12] Гелес И.С., Коржицкая З.А., Агеева М.И. Использование тонкомерной древесины от рубок прореживания в производстве сульфатной целлюлозы // Химия и технология целлюлозы и лигнина: Межвуз. сб. науч. тр. / ред. Ю.Н. Непенин Л.: ЛТА, 1982. С. 29–33.
- [13] Технология целлюлозно-бумажного производства. Справочные материалы. В 3 т. // Сырье и производство полуфабрикатов. СПб.: Политехника, 2002. Т. 1. Ч. 1. 425 с.
- [14] Хакимова Ф.Х., Хакимов Р.Р., Носкова О.А. Молодая древесина ели и березы — полноценное сырье для целлюлозно-бумажной промышленности // Химия растительного сырья, 2018. № 3. С. 261–270.
- [15] Пен Р.З. Технология целлюлозы. В 2 т. // Сульфитные способы получения, очистка, отбелка, сушка целлюлозы. Красноярск: СибГТУ, 2002. Т. 2. 357 с.
- [16] Дулькин Д.А., Миронова В.Г., Южанинова Л.А. Исследование вододерживающей способности волокнистой массы по методу G. Жауме // Теория и технология бумажно-картонной продукции из вторичного волокнистого сырья: науч. тр. 5-й Междунар. науч.-техн. конф. Караваево, 19–21 мая 2004 г. Правда-Караваево, 2004. С. 27–31.
- [17] Пен Р.З. Планирование эксперимента в Statgraphics. Красноярск: СибГТУ, 2003. 246 с.
- [18] Гелес И.С. Древесная биомасса и основы экологически приемлемых технологий ее химико-механической переработки. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2001. 382 с.
- [19] Хакимова Ф.Х. Отбелка бисульфитной целлюлозы из древесины спелой и молодой тонкомерной ели и березы // Химия растительного сырья, 2006. № 2. С. 11–18.
- [20] Гелес И.С., Коржицкая З.А., Агеева М.И. Влияние добавок тонкомерной древесины на свойства сульфатной целлюлозы // Химия и технология целлюлозы: Межвуз. сб. науч. тр. Л.: ЛТА, 1980. С. 20–36.
- [21] Лысяк Т.К., Непенин Ю.Н., Жалина В.А. Влияние добавок щепы из тонкомерной древесины на выход и качество сульфатной целлюлозы // Изв. вузов. Лесной журнал, 1981. № 5. С. 87–90.

## Сведения об авторах

**Хакимова Фирдавес Харисовна** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технология полимерных материалов и порохов» ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», [tcbr@pstu.ru](mailto:tcbr@pstu.ru)

**Синяев Константин Андреевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Химические технологии» ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», [tcbr@pstu.ru](mailto:tcbr@pstu.ru)

**Хакимов Роман Рашидович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Химические технологии» ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», [tcbr@pstu.ru](mailto:tcbr@pstu.ru)

**Носкова Ольга Алексеевна** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Химические технологии» ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», [tcbr@pstu.ru](mailto:tcbr@pstu.ru)

Поступила в редакцию 03.12.2019.

Принята к публикации 19.12.2019.

## YOUNG THIN WOOD FROM SANITATION CUTTINGS AS STOCKPILE OF RAW MATERIALS FOR PULP AND PAPER PRODUCTION

F.Kh. Khakimova, K.A. Sinyaev, R.R. Khakimov, O.A. Noskova

Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolsky prospekt, 614000, Perm, Russia

oa-noskova@mail.ru

The work is devoted to increasing the complexity of the use of wood raw materials — one of the most important directions of solving modern requirements of rational nature management and environmental protection. Replacement of ripe wood with young thin wood from logging of forest care is of economic and ecological importance. The possibility and expediency of bisulfite cooking (delignification) for young spruce, pine, birch wood from logging in comparison with ripe wood is investigated. Young wood is delignified with bisulfite cooking solution without difficulty, but somewhat slower compared to the corresponding breed of ripe wood. Young pine wood, containing less resinous substances than ripe, is delignified more easily than balance pine wood and can be used to produce bisulfite pulp. The optimal modes of bisulfite delignification for young spruce, pine and birch wood, allowing to obtain pulp with high mechanical strength, are determined. It is shown that the pulp of the young wood refining lighter and has a higher mechanical strength than that of ripe; however, the pulp of the young wood is dehydrated somewhat more difficult and has a high water-holding capacity. Sorting out the young small-diameter wood harvested at thinning, time-consuming and not always desirable. The possibility of bisulfite delignification of technological chips from a mixture of different species of thin wood has been established. Diagrams «composition of wood chips — properties of pulp» are constructed, which allow predicting paper-forming properties of the produced pulp with a known composition of wood raw materials. The possibility of adding 10–20 % of young spruce, birch and pine wood during traditional bisulfite cooking of balance spruce wood is shown, which does not cause difficulties in the cooking process and does not reduce the quality of the producing pulp.

**Keywords:** small-diameter wood, forest thinning, spruce, birch, pine young and ripe wood, bisulfite cooking, pulp, quality indicators, cooking a mixture of wood species, cooking ripe wood with additives young.

**Suggested citation:** Khakimova F.Kh., Sinyaev K.A., Khakimov R.R., Noskova O.A. *Molodaya tonkomernaya drevesina ot rubok ukhoda za lesom — rezerv syr'ya dlya proizvodstva tsellyulozy i bumagi* [Young thin wood from sanitation cuttings as stockpile of raw materials for pulp and paper production]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 2, pp. 88–97. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-88-97

### References

- [1] Geles I.S. *Drevesnoe syr'e — strategicheskaya osnova i rezerv tsivilizatsii* [Wood raw materials are the strategic basis and reserve of civilization]. Petrozavodsk: Forest Institute, Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, 2007, 499 p.
- [2] Geles I.S., Korzhitskaya Z.A. *Biomassa dereva i ee ispol'zovanie* [Tree biomass and its use]. Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 1992, 230 p.
- [3] Belovezhets L.A., Volchatova I.V., Medvedeva S.A. *Perspektivnye sposoby pererabotki vtorichnogo lignotsellyuloznogo syr'ya* [Promising methods of processing secondary lignocellulosic raw materials]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw materials], 2010, no. 2, pp. 5–16.
- [4] Koverninskiy I.N., Komarov V.I., Tret'yakov S.I., Bogdanovich N.I., Sokolov O.M., Kutakova H.A., Selyanina L.I. *Kompleksnaya khimicheskaya pererabotka drevesiny* [Integrated chemical processing of wood]. Arkhangel'sk: ASTU, 2003, 344 p.
- [5] Nepenin Yu.N., Zhalina V.A. *Tonkomernaya drevesina kak syr'e dlya tsellyulozno-bumazhnoy promyshlennosti* [Fine wood as a raw material for the pulp and paper industry]. *Drevesnoe syr'e i vozmozhnosti ego kompleksnogo ispol'zovaniya* [Wood raw materials and the possibility of its integrated use] Ed. I.S. Geles. Petrozavodsk: CF of the Academy of Sciences of the USSR, 1983, pp. 101–108.
- [6] Molotkov L.K. *Ispol'zovanie v TsBP otkhodov drevesiny lesozagotovok i ot rubok ukhoda za lesom* [The use in the pulp and paper industry of wood waste from logging and from thinning]. Moscow: VNIPIEIllesprom, 1987, 41 p.
- [7] Holekamp James A. The efficient harvest, transport and milliard process of smallwood pine. *AIChE Symp Ser.*, 1980, v. 76, no. 195, pp. 12–19.
- [8] McCormack R. A mechanized harvesting system for Pinus radiata thinnings. *Appita*, 1979, v. 32, no. 4, pp. 291–294.
- [9] Pen R.Z., Ryazanova T.V. *Kompleksnaya khimicheskaya pererabotka drevesiny* [Integrated chemical processing of wood]. Krasnoyarsk: SibGTU, 2012, 158 p.
- [10] Andreeva A.A. *Resursoberezhenie i ispol'zovanie otkhodov zagotovki i pererabotki drevesnogo syr'ya* [Resource Saving and Use of Wastes from the Harvesting and Processing of Wood Raw Materials] *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya problemy i rezul'taty* [Fundamental and Applied Studies of the Problem and Results], 2014, no. 10, pp. 148–155.
- [11] Sudakova I.G., Rudenko N.B. *Poluchenie tverdykh biotopliv iz rastitel'nykh otkhodov (obzor)* [Obtaining solid biofuels from plant waste (review)] *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Khimiya* [Journal of the Siberian Federal University. Chemistry], 2015, v. 8, no. 4, pp. 499–513.
- [12] Geles I.S., Korzhitskaya Z.A., Ageeva M.I. *Ispol'zovanie tonkomernoy drevesiny ot rubok prorezhivaniya v proizvodstve sul'fatnoy tsellyulozy* [The use of fine wood from thinning in the production of sulfate cellulose] *Khimiya i tekhnologiya tsellyulozy i lignina: Mezhdvuz. sb. nauchn. tr.* [Chemistry and technology of cellulose and lignin: Interuniversity. Scientific tr.] Ed. Yu.N. Nepenin. Leningrad: LTA, 1982, pp. 29–33.
- [13] *Tekhnologiya tsellyulozno-bumazhnogo proizvodstva. Spravochnye materialy. V 3 t.: Syr'e i proizvodstvo polufabrikatov* [Pulp and paper technology. Reference materials. In 3 t.: Raw materials and production of semi-finished products]. St. Petersburg: Polytechnic, 2002, v. 1, part 1, 425 p.

- [14] Khakimova F.Kh., Khakimov R.R., Noskova O.A. *Molodaya drevesina eli i berezy — polnotsennoe syr'e dlya tsellyulozno-bumazhnoy promyshlennosti* [Young wood of spruce and birch is a complete raw material for the pulp and paper industry] *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw materials], 2018, no. 3, pp. 261–270.
- [15] Pen R.Z. *Tekhnologiya tsellyulozy. V 2 t.* [Pulp technology. In 2 t.] *Sul'fitnye sposoby polucheniya, ochildka, otbelka, sushka tsellyulozy* [Sulfite production methods, cleaning, bleaching, drying of pulp]. Krasnoyarsk: SibGTU, 2002, v. 2, 357 p.
- [16] Dul'kin D.A., Mironova V.G., Yuzhaninova L.A. *Issledovanie vodouderzhivayushchey sposobnosti voloknistoy massy po metodu G. Jayme* [The study of the water-holding ability of the pulp according to the method of G. Jayme] *Teoriya i tekhnologiya bumazhno-kartonnoy produktsii iz vtorichnogo voloknistogo syr'ya: Nauchn. tr. 5-y Mezhdunar. nauchn.-tekhn. konf.* [Theory and technology of paper and cardboard products from recycled fiber: Scientific. tr 5th International scientific and technical conf.]. Pravda-Karavaevo, 2004, pp. 27–31
- [17] Pen R.Z. *Planirovanie eksperimenta v Statgraphics* [Planning an experiment in Statgraphics]. Krasnoyarsk: SibGTU, 2003, 246 p.
- [18] Geles I.S. *Drevesnaya biomassa i osnovy ekologicheski priemlemykh tekhnologiy ee khimiko-mekhanicheskoy pererabotki* [Woody biomass and the basics of environmentally acceptable technologies for its chemical-mechanical processing]. Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2001, 382 p.
- [19] Khakimova F.Kh. *Otbelka bisul'fitnoy tsellyulozy iz drevesiny speloy i molodoy tonkomernoy eli i berezy* [Bleaching of bisulfite cellulose from ripe and young fine-sized spruce and birch wood] *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of Plant Raw Materials], 2006, no. 2, pp. 11–18.
- [20] Geles I.S., Korzhitskaya Z.A., Ageeva M.I. *Vliyanie dobavok tonkomernoy drevesiny na svoystva sul'fatnoy tsellyulozy* [The effect of fine wood additives on the properties of sulphate pulp] *Khimiya i tekhnologiya tsellyulozy* [Chemistry and technology of cellulose]. Leningrad: LTA, 1980, pp. 20–36.
- [21] Lysyak T.K., Nepenin Yu.N., Zhalina V.A. *Vliyanie dobavok shchepy iz tonkomernoy drevesiny na vykhod i kachestvo sul'fatnoy tsellyulozy* [The effect of additives of chips from fine wood on the yield and quality of sulphate pulp] *Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal* [News of universities. Forest Journal], 1981, no. 5, pp. 87–90.

## Authors' information

**Khakimova Firdaves Kharisovna** — Dr. Sci. (Tech.), Honored worker of higher school, Professor of the Department «Technology of polymer materials and gunpowder» FSBEI «Perm national research polytechnic university», [tcbp@pstu.ru](mailto:tcbp@pstu.ru)

**Sinyaev Konstantin Andreevich** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Chemical technologies, Perm national research polytechnic university, [tcbp@pstu.ru](mailto:tcbp@pstu.ru)

**Khakimov Roman Rashidovich** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Chemical technologies, Perm national research polytechnic university, [tcbp@pstu.ru](mailto:tcbp@pstu.ru)

**Noskova Olga Alekseevna** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Chemical technologies, Perm national research polytechnic university, [tcbp@pstu.ru](mailto:tcbp@pstu.ru).

Received 03.12.2019.

Accepted for publication 19.12.2019.

УДК 630\*81

DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-98-110

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ КОРЫ ЛИСТВЕННИЦЫ СИБИРСКОЙ: НАТУРАЛЬНОЙ, ХИМИЧЕСКИ МОДИФИЦИРОВАННОЙ И ПОСЛЕ АДСОРБЦИИ КАТИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

С.Р. Лоскутов, Е.А. Петрунина, О.А. Шапченкова,  
М.А. Пляшечник, В.В. Стасова

Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН — Обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, д. 50/28

petrunina@ksc.krasn.ru

Представлен сравнительный анализ физико-химических свойств натуральной коры лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ldb.), химически модифицированной для придания ей катионообменных свойств и после использования в качестве биосорбента катионов меди из водных растворов сульфата меди. Показано, что химическое модифицирование коры в целях придания ей катионообменных свойств не приводит к заметному изменению морфолого-анатомического строения, а полученный биосорбент адсорбирует катионы  $\text{Cu}^{2+}$  из водного раствора с образованием агрегатов на частицах биосорбента, содержащих металл, который можно обнаружить рентгеноспектральным анализатором сканирующего электронного микроскопа. С помощью хромато-масс-спектрометрии по методу парофазного пробоотбора проанализировано изменение состава легколетучих компонентов коры — моно- и сесквитерпенов, дитерпенов и кислородсодержащих углеводов, вызванное модифицированием. По анализу термогравиметрических данных, полученных при проведении опытов в окислительной среде (на воздухе), установлены температурные диапазоны отдельных стадий термодеструкции опытных образцов, соответствующие им изменения массы и скорости потери массы при программируемом нагреве. Кинетический анализ этих данных осуществлен двумя методами: изоконверсионным методом Озавы — Флинна — Уолла и методом Бройдо. Рассчитанные значения энергии активации в зависимости от степени конверсии позволяют дифференцировать исследованные образцы по изменению их термических свойств, связанному с модифицированием и адсорбцией катионов металла. С помощью дифференциальной сканирующей калориметрии опытным путем установлены изменения тепловых эффектов в процессе окислительной термодеструкции при нагревании со скоростью  $10\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$  в температурном диапазоне от 25 до  $700\text{ }^\circ\text{C}$ , вызванные химическим модифицированием коры и сорбцией тяжелого металла ( $\text{Cu}^{2+}$ ).

**Ключевые слова:** натуральная кора лиственницы сибирской, модифицированная кора (биосорбент тяжелых металлов), термический анализ, сканирующая электронная микроскопия, хромато-масс-спектрометрия, физико-химические показатели

**Ссылка для цитирования:** Лоскутов С.Р., Петрунина Е.А., Шапченкова О.А., Пляшечник М.А., Стасова В.В. Физико-химические показатели коры лиственницы сибирской: натуральной, химически модифицированной и после адсорбции катионов тяжелых металлов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 2. С. 98–110. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-98-110

В результате переработки древесины на предприятиях лесного комплекса образуется многоотходный отход — кора, поэтому поиск путей утилизации коры признан актуальной задачей. В некоторых исследованиях показано, что таннидосодержащее растительное сырье можно химически модифицировать с получением сорбента, обладающего катионообменными свойствами. Частично свойства таких сорбентов и способы их использования для улавливания тяжелых металлов из обедненных промышленных стоков рассмотрены в работах [1–7]. Несмотря на невысокую обменную емкость, их использование для обезвреживания водных стоков с низкой концентрацией высокотоксичных катионов металлов экономически более выгодно по сравнению с синтетическими сорбентами, обладающими катионообменными свойствами и большой обменной емкостью, ввиду сравнительно недорогого производства. Вместе с тем слабо изучены изменения

физико-химических показателей древесной коры, вызванные модифицированием, и свойства отработанного биосорбента, что необходимо, с одной стороны, для совершенствования методов модифицирования, с другой — для определения способов финальной утилизации использованного продукта.

Проведение термического анализа позволяет оценить влияние той или иной обработки растительного сырья по убыли массы на отдельных стадиях термической деструкции, температурным интервалам индивидуальных стадий, скорости термического разложения (rate of thermal decomposition) и величине тепловых эффектов в исследуемом температурном диапазоне [8]. Кинетический анализ термогравиметрических данных с помощью некоторых методов (моделей) [9–13] дает возможность четко дифференцировать исследуемые образцы по характеру изменения энергии активации на отдельных стадиях (по Бройдо)

и в зависимости от степени термодеструкции (по изоконверсионному методу Озавы — Флинна — Уолла — ОФУ) [11, 12, 14, 15].

Отмеченные характеристики зависят от химического состава растительного материала и взаимодействия компонентов. Содержанием гемицеллюлоз, целлюлозы, лигнина и экстрактивных веществ определяется вид ТГ-, ДТГ- и ДСК-кривых (ТГ — термогравиметрия, ДТГ — дифференциальная термогравиметрия, ДСК — дифференциальная сканирующая калориметрия) анализируемых образцов и, как следствие, значение кинетических параметров термодеструкции [16–18], поэтому изменение количественного соотношения основных компонентов и/или структурных характеристик коры под действием модифицирования должно быть отражено параметрами этих кривых.

При неизотермическом термоокислительном разложении коры в ходе ТГ- и ДСК-опытов происходит испарение влаги, разложение гемицеллюлоз, целлюлозы, экстрактивных веществ, лигнина и окисление (сгорание) образовавшегося угля [19–21]. Протекание стадий термодеструкции после испарения влаги (при температуре выше ~180...200 °С) характеризуется некоторым перекрыванием температурных диапазонов термического разложения компонентов вещества коры, степень которого зависит от предыстории и типа образца [8, 17].

Авторы работы [8] отмечают, что при термическом разложении коры ели в окислительной среде четко выделяются три стадии термодеструкции в температурных диапазонах 57...188, 228...455 и ~750...810 °С при соответствующей потере массы: 9,8 % (от испарения влаги); 47,6 (от термического разложения целлюлозы) и 35,0 % (от термодеструкции лигнина). Неразложившийся остаток составляет 7,6 %. Рассчитанные значения энергии активации по методу Фримена — Кэрола для температурных диапазонов 200...245 и 245...370 °С равны 134,9 и 45,3 кДж·моль<sup>-1</sup> соответственно. Авторы [8] также отмечают, что процессы термической деградации целлюлозы и лигнина перекрываются в условиях неизотермического ТГ-анализа.

В исследовании [22] представлены результаты ТГ-исследования коры и основных компонентов *Pinus taeda* L.: коры, обессмоленной экстракцией нейтральными растворителями; полифенольных веществ, экстрагированных однопроцентным раствором гидроксида натрия; послеэкстракционного остатка; холоцеллюлозы и лигнина. Термоокислительная деструкция всех исследованных образцов наблюдалась практически в одном и том же температурном диапазоне — от ~200 до ~510 °С. Однако зависимость потери массы и,

соответственно, вид ДТГ-кривых в этом температурном интервале отличались убылью массы в одних и тех же температурных интервалах, положением максимумов, шириной и высотой пиков.

Аналогичное исследование по ТГ коры *Quercus variabilis* проведено авторами работы [13]. Основное заключение, которое можно сделать из опубликованных результатов, состоит в следующем. Сложность химического состава коры и различная термостабильность компонентов обуславливает многостадийность процесса окислительной термодеструкции с некоторым перекрыванием стадий потери массы при нагреве необработанной коры. Какая-либо обработка (например, экстракция) коры приводит к заметному изменению параметров ТГ- и ДТГ-кривых и, как следствие, к изменению кинетических показателей термического разложения.

В исследовании [23] по термическому анализу экстрактов конденсированных таннинов коры веймутовой сосны (*Pinus strobus* L.) установлено, что присутствие в экстрактах водорастворимых полисахаридов до 30 % приводит к снижению термостабильности полифенольных соединений на ~50 °С и увеличению энергии активации термодеструкции от 270 до ~640 кДж/моль.

Комплекс ТГ-, ДТГ-, ДСК-параметров и кинетики термического разложения природных и модифицированных образцов коры позволяет дифференцировать их по влиянию на них той или иной обработки исходного (природного) материала.

## Цель работы

Цель работы — сравнительный анализ термических характеристик натуральной коры лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ldb.), химически модифицированной в целях придания получаемому продукту катионообменных свойств, а также характеристик использованного биосорбента после извлечения катионов меди из водного раствора.

## Материалы и методы

Объектом исследований служила кора лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ldb.), заготовленная в лесостепной зоне Красноярского края в насаждениях II–III классов возраста. Крупные куски коры высушивали на воздухе при комнатной температуре ( $21 \pm 2$  °С), измельчали и отделяли фракцию 0,5...1,0 мм, которую использовали в экспериментах.

Термин «кора» применяется для обозначения всех тканей, находящихся снаружи от камбия: вторичной флоэмы, первичных тканей, которые еще могут оставаться снаружи от вторичной флоэмы, перидермы и мертвых тканей снаружи от

перидермы [24]. Кора лиственницы, как и других хвойных, имеет сложное строение. Она состоит из живой (флоэма или луб) и мертвой (корка, или ритидом) частей. Строение коры хвойных растений (особенно живой ее части) наиболее подробно описано в работах В.М. Еремина [25, 26] и Л.И. Лотовой [27].

Корка, или ритидом, представляет собой наружную зону коры, в которой отмершие участки луба разделены перидермами. В состав перидермы входят феллоген (пробковый камбий), феллема (пробка) и феллодерма. Клетки феллогена на поперечном срезе прямоугольные, уплощенные по радиусу, на продольных — прямоугольные или полигональные, иногда довольно неправильные. Клетки пробки имеют почти призматическую форму, располагаются компактно, без межклетников, оболочка клеток суберинизирована. Суберин обычно встречается в виде отдельной пластинки, покрывающей исходную первичную целлюлозную оболочку, которая может одревесневать [24]. У лиственницы кроме типичной формируются также губчатая и каменистая пробки. Губчатая пробка состоит из нескольких слоев крупных прозрачных тонкостенных клеток, оболочки клеток суберинизированы. Именно по этим клеткам происходит разрыв при слущивании чешуек коры. Каменистая пробка сложена клетками с толстыми, слоистыми, пористыми стенками, содержащими лигнин. Ширина перидерм составляет 0,4...0,7 мм, прослойки отмерших тканей — до 1 мм [26]. Отмершие участки тканей, «отрезанные» от луба перидермами, состоят из тонкостенных гипертрофированных паренхимных клеток с извилистыми стенками, склерееид, кристаллоносных клеток и пустых смолеместиллиц; ситовидные клетки и лучи четко не выявляются [27].

Приведем химический состав коры лиственницы сибирской [28] (содержание, % абс. сух. коры):

Углеводный комплекс: пентозаны, пектин, уроновые кислоты и др. ....	47,67
Липиды .....	3,75
Фенольные вещества (фенолоксилоны, танины и т. п.) .....	21,15
Лигнин .....	23,3
Зольные вещества .....	2,25

Модифицирование коры осуществляли по методу фенолформальдегидной конденсации с использованием серной кислоты в качестве катализатора [2, 29].

Визуальный контроль образцов исходной (натуральной) коры лиственницы, биосорбента, полученного химическим модифицированием исходного сырья, и «отработанного» биосорбента по извлечению меди из водного раствора сульфата меди, осуществляли с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) ТМ-1000

(НИТАСН, Япония) с рентгеноспектральным анализатором SwiftED-TM EDX (Oxford Instruments Analytical Ltd., Великобритания).

Термогравиметрию и ДСК проводили соответственно с помощью приборов TG 209 F1 и DSC 204 F1 (NETZSCH, Германия). Образцы коры проанализированы в атмосфере воздуха при следующих условиях:

*ТГ*: скорость нагрева 10, 20 и 40 °С·мин<sup>-1</sup> в диапазоне 25...700 °С; скорость потока защитного и продувочного газов 20 мл·мин<sup>-1</sup>; масса образца 7,00...9,55 мг; тигель корундовый цилиндрической формы;

*ДСК*: скорость нагрева 10 °С·мин<sup>-1</sup> в диапазоне от 25...590 °С, скорость потока защитного и продувочного газов 40 мл·мин<sup>-1</sup>; масса образца 0,20...1,24 мг; тигель алюминиевый с перфорированной крышкой; эталон — пустой алюминиевый тигель.

Калибровка приборов осуществлялась с использованием реперных веществ, прилагаемых к приборам. Образцы взвешивали для анализа на лабораторных весах XFR-125E.

Все измерения проведены с использованием «усредненных» образцов. Для определения инструментальной погрешности статистический анализ определяемых величин выполнен для «стандартного» образца древесины лиственницы в пяти аналитических повторностях. Стандартное отклонение потери массы на разных стадиях термодеструкции изменялось в пределах от 0,21 до 1,07 %, температура максимумов ДТГ — от 0,36 до 0,84 °С, а ДТГ<sub>max</sub> — от 0,08 до 0,68 °С·мин<sup>-1</sup> ( $P = 0,05$ ). Различия параметров термодеструкции исследованных образцов, которые превышали экспериментально установленную погрешность измерений, считали достоверными.

Результаты измерений обработаны с помощью пакета программ «NETZSCH Proteus Thermal Analysis 4.8.4» (рис. 1).

Анализ кинетики термодеструкции образцов коры проводили на основе ТГ-данных с использованием изоконверсионного метода ОФУ [15, 16] и по методу Бройдо [14].

Метод ОФУ часто используется для расчета кинетических характеристик процессов термодеструкции различных материалов по ТГ-кривым. В соответствии с этим методом уравнение для расчета энергии активации имеет вид [30]

$$\ln \beta \cong \ln \left( \frac{AE_a}{RF\alpha} \right) - 5,3305 - 1,052 \frac{E_a}{RT}, \quad (1)$$

где  $T$  — температура;

$\beta$  — скорость нагрева;

$A$  — предэкспоненциальный множитель (частный фактор);

$E_a$  — энергия активации;

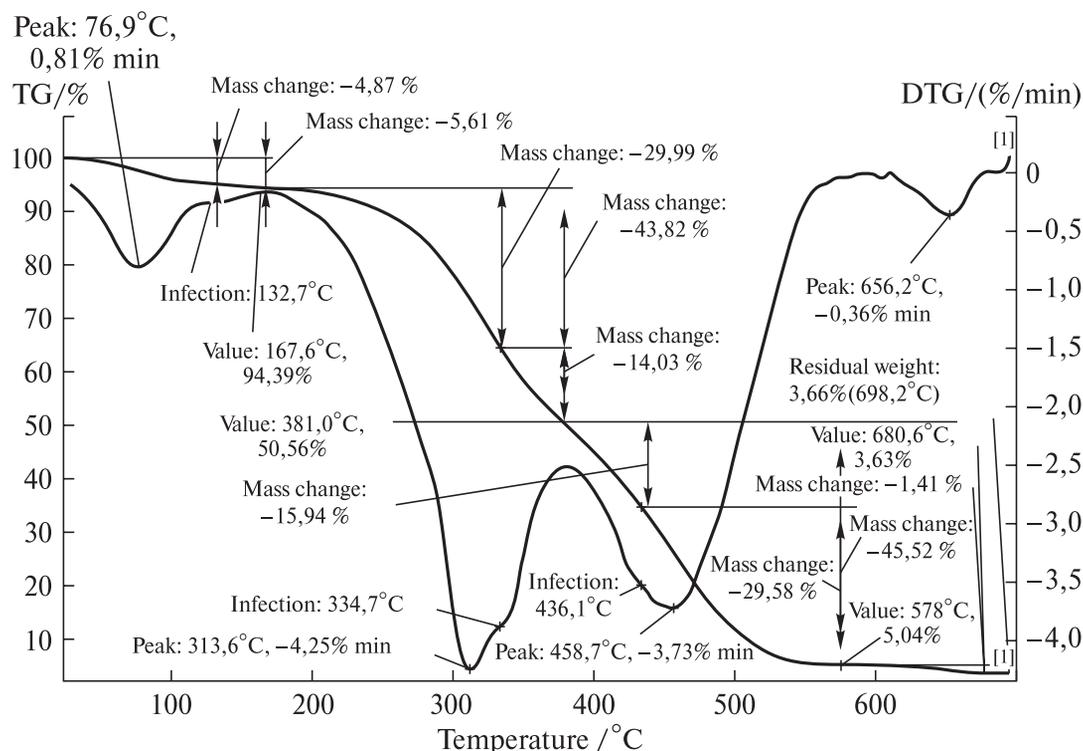


Рис. 1. Пример первичной обработки результатов термогравиметрии и дифференциальной термогравиметрии натуральной коры лиственницы сибирской

Fig. 1. An example of the primary processing of thermogravimetry and differential thermogravimetry of the natural bark of Siberian larch results

$R$  — универсальная газовая постоянная;

$F\alpha$  — математическое представление кинетической модели;

$\alpha = \frac{m_0 - m}{m_0 - m_f}$  — степень превращения, здесь  $m_0$  — начальная масса образца в термогравиметрическом опыте;  $m$  — текущее значение массы при температуре  $T$ ;  $m_f$  — масса образца после завершения процесса термодеструкции.

Метод ОФУ основан на предположении о том, что скорость реакции при постоянном значении степени термического разложения  $\alpha$  зависит только от температуры. Энергия активации  $E_a$  термического разложения исследуемого образца определяется значением угла наклона прямой, построенной в координатах

$$\ln \beta - \frac{1}{T}$$

для некоторых значений  $\alpha$ , при этом не требуется знания механизма (порядка) реакции.

Бройдо впервые получил уравнение, которое применил для расчета энергии активации термического разложения целлюлозы [14, 31]:

$$\ln \left( \ln \frac{1}{y} \right) = -\frac{E_a}{RT} + \ln \frac{ART_m^2}{\beta E_a}, \quad (2)$$

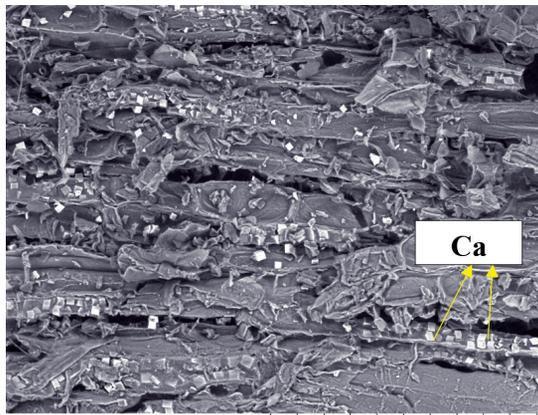
где  $y$  — массовая доля неразложившегося анализируемого вещества;

$T_m$  — температура, соответствующая максимуму на ДТГ-кривой.

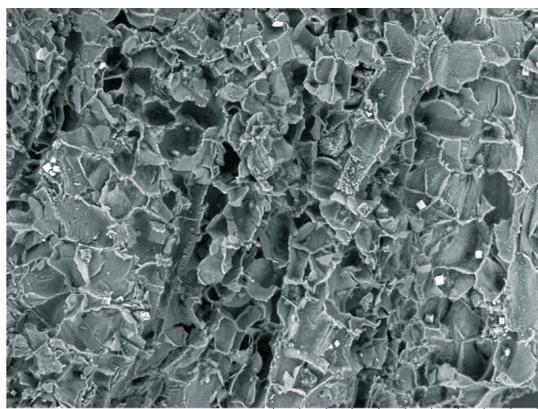
В последние годы это уравнение широко используется для расчета кинетических характеристик по ТГ-кривым различных материалов для процессов, протекающих по механизму реакции порядка  $n \leq 1$  [32–35]. Из уравнения (2) следует, что энергия активации  $E_a$  определяется по углу наклона прямой, построенной в координатах

$$\ln \left( \ln \frac{1}{y} \right) - \frac{1}{T}.$$

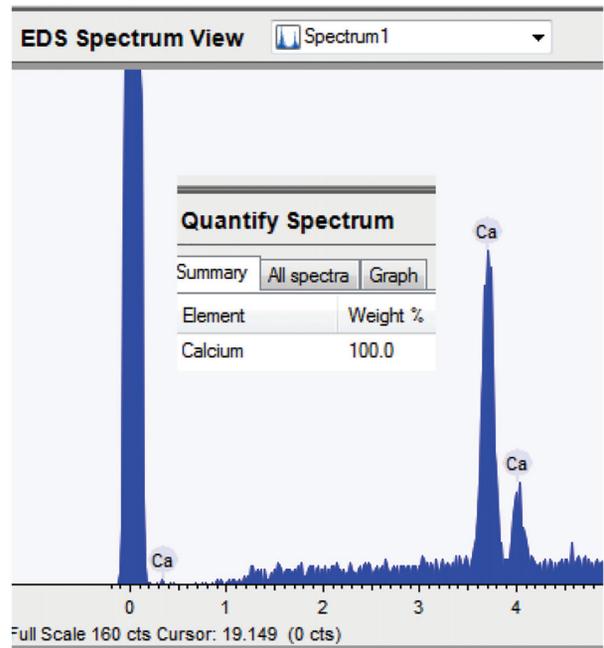
Определение компонентного состава летучих веществ образцов натуральной коры лиственницы сибирской (НКЛ) и ее модифицированной коры (МКЛ) осуществляли с помощью хромато-масс-спектрометра Agilent 5975C-7890A фирмы Agilent (США) с использованием парофазного пробоотборника (varor probatory HeadSpace Sampler G 1888). Масса образца для анализа составляла около 200 мг. Применяли 30-метровую кварцевую колонку HP-5 (сополимер 5%-дифенил-95%-диметилсилоксан) с внутренним диаметром 0,25 мм. В качестве газа-носителя использовался гелий с постоянным потоком 1,1 мл/мин. Температура колонки: начальный изотермический участок 50 °C (10 мин), повышение температуры со скоростью 4 °C·мин<sup>-1</sup> от 50 до 200 °C, со скоростью



TM-1000\_3068 2019.04.26 L D3.7 x250 300 мм  
a



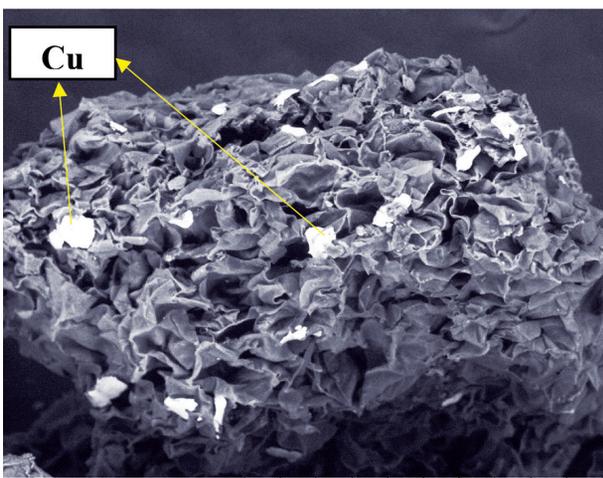
TM-1000\_3071 2019.04.26 L D3.7 x250 300 мм  
b



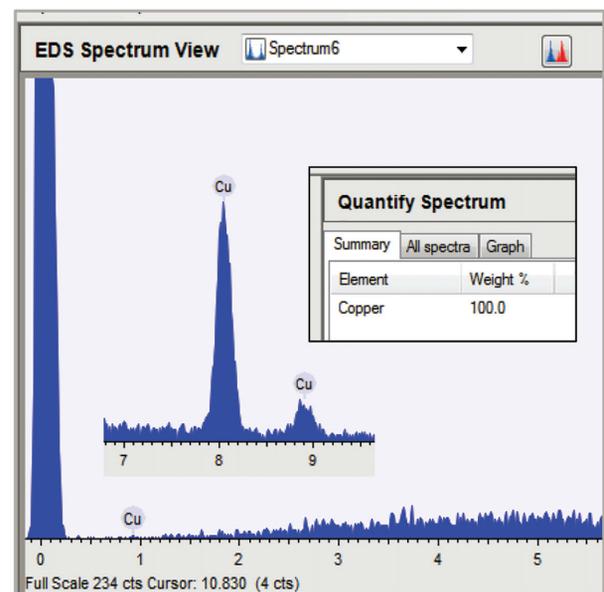
v

Рис. 2. СЭМ-изображения коры лиственницы сибирской: а — НКЛ с включениями кристаллов оксалата кальция; б — МКЛ; в — энергодисперсионный спектр минеральных включений

Fig. 2. SEM images of the Siberian larch bark: a — NKL with inclusions of calcium oxalate crystals; б — MKL; в — energy dispersive spectrum of mineral inclusions



TM-1000\_2434 2016.08.10 L D2.7 x300 300 мм  
a



б

Рис. 3. СЭМ-изображение частицы МКЛ-Cu<sup>2+</sup> с агрегатами минеральных включений (а) и их энергодисперсионный спектр (б)

Fig. 3. SEM image of MKL-Cu<sup>2+</sup> particles with aggregates of mineral inclusions (a) and their energy dispersive spectrum (b)

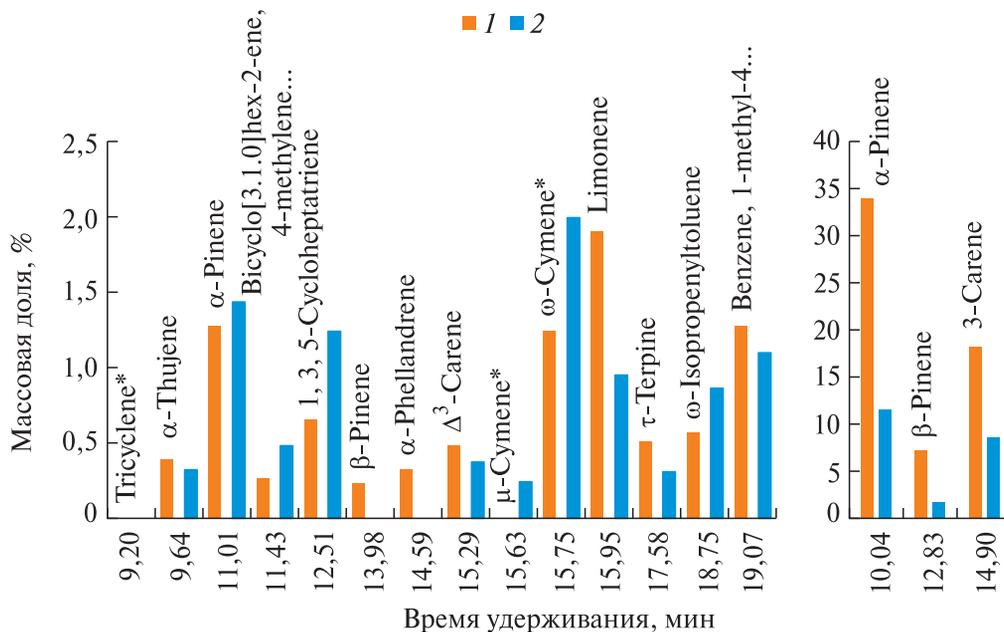


Рис. 4. Летучие вещества коры лиственницы: 1 — НКЛ, 2 — МКЛ; звездочкой обозначены следы  
 Fig. 4. Volatile substances of larch bark: 1 — NKL, 2 — MKL; asterisk marks traces

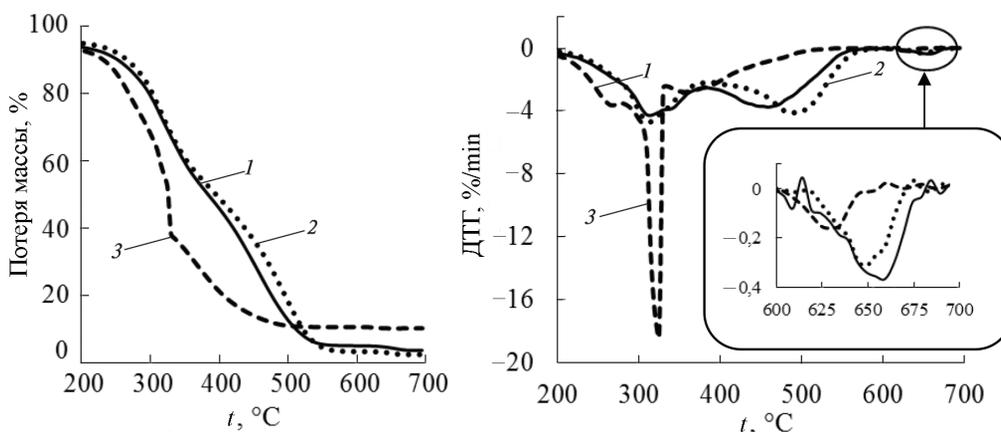


Рис. 5. ТГ- и ДТГ-профили термодеструкции экспериментальных образцов в окислительной среде (воздух) при нагревании со скоростью 10 °С·мин<sup>-1</sup>: 1 — НКЛ, 2 — МКЛ, 3 — МКЛ-Cu<sup>2+</sup>  
 Fig. 5. TG and DTG profiles of thermal degradation of experimental samples in an oxidizing medium (air) upon heating at a rate of 10 °C·min<sup>-1</sup>: 1 — NKL, 2 — MKL, 3 — MKL-Cu<sup>2+</sup>

20 °С·мин<sup>-1</sup> — до 280 °С, (изотермический участок — 5 мин).

Приведем параметры парофазного пробоотборника:

Температура, °С	
термостата .....	160
петли .....	170
НС-интерфейса .....	175
испарителя .....	280
ионизационной камеры .....	170

Время выдержки образца в термостате пробоотборника, мин .....	7
Энергия ионизации, эВ .....	70
Идентификацию компонентов проводили ме-	

тодом сравнения по наличию и соотношению характеристичных ионов-фрагментов с использованием базы данных стандартных образцов из масс-спектральной библиотеки «NIST05a. L» и значениям линейных индексов удерживания, используя программу обработки данных AMDIS («The Automated Mass Spectral Deconvolution and Identification System»).

### Результаты и обсуждение

Изображения НКЛ (рис. 2, а) МКЛ (рис. 2, б) и энергодисперсионный спектр минеральных включений (рис. 2, в) получены с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ).

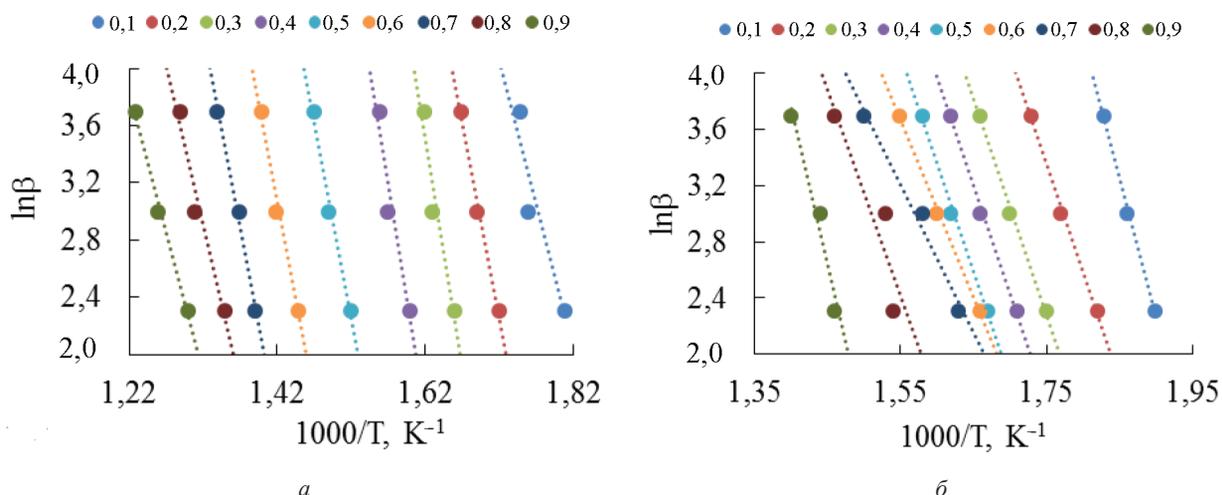


Рис. 6. Зависимость термического разложения НКЛ (а) и МКЛ-Cu<sup>2+</sup> (б) от нагревания со скоростью 10, 20 и 40 °С·мин<sup>-1</sup> при степени конверсии от 0,1 до 0,9

Fig. 6. The dependence of the thermal decomposition of NKL (a) and MKL-Cu<sup>2+</sup> (b) on heating at a rate of 10, 20 and 40 °C·min<sup>-1</sup> with a degree of conversion from 0,1 to 0,9

Изображение отработанного биосорбента после контактирования с водным раствором сульфата меди (МКЛ-Cu<sup>2+</sup>) получено (рис. 3) с помощью СЭМ.

Из рис. 2 и 3 видно, что модифицирование коры и последующая адсорбция меди на полученном биосорбенте не оказывают заметного влияния на строение ткани коры. Вместе с тем наличие серной кислоты в модифицирующей среде приводит к существенному выносу из коры оксалата кальция в ходе модифицирования (см. рис. 2, б). При контактировании биосорбента с водным раствором сульфата меди происходит адсорбция катионов Cu<sup>2+</sup> по механизму ионного обмена с образованием агрегатов сорбата на активных центрах биосорбента (см. рис. 3) [4, 7, 29].

При нагревании образцов НКЛ и МКЛ в ТГ-опыте до ~170 °С органические вещества улетучиваются (кроме влаги) без разложения. Хромато-масс-спектрометрический анализ показал преобладание в составе коры летучих веществ углеводородов, обусловивших изменение состава и относительного их содержания в результате модифицирования коры (рис. 4). Наиболее заметные (≥ 50 %) изменения коснулись некоторых монотерпенов: α-Pinene; β-Pinene; Δ<sup>3</sup>-Carene; Bicyclo[3.1.0]hex-2-ene,4-methylene-1(1-methylethyl); 1,3,5-Cycloheptatriene, 3,7,7-trimethyl; μ-Cymene; Limonene; τ-Terpinen и ω-Isopropenyltoluene.

Сравнение процесса термодеструкции экспериментальных образцов по результатам ТГ (рис. 5) показало, что зависимость потери массы образцами НКЛ и МКЛ от температуры в диапазоне 200...380 °С, отвечающем преимущественному термическому разложению углеводного комплекса (гемицеллюлозы и целлюлоза) и кон-

Т а б л и ц а 1

**Термическое разложение коры лиственницы сибирской в окислительной среде: температурный диапазон и соответствующая ему потеря массы**

**Thermal decomposition of Siberian larch bark in an oxidizing environment: temperature range and its corresponding mass loss**

Образец коры	Δt, °С	Потеря массы (ТГ), %	Остаточная масса*, %
НКЛ	29...133	4,87	3,66
	133...168	0,74	
	168...335	29,99	
	335...381	14,03	
	381...436	15,94	
	436...578	29,58	
	578...681	1,41	
МКЛ	29...138	4,42	2,44
	138...174	0,44	
	174...332	28,04	
	332...388	15,62	
	388...601	48,18	
	601...698	0,85	
МКЛ-Cu <sup>2+</sup>	29...165	6,40	10,18
	165...276	16,64	
	276...333	39,69	
	333...544	26,80	
	586...698	0,36	

\*Зольные вещества и недоокисленный уголь.

денсированным танинам, практически совпадают. Существенное различие хода ТГ- и ДТГ-кривых для этих образцов наблюдается при температуре выше 400 °С. При этом происходят преимущественная термодеструкция лигнина и окисление образующегося угля. Наиболее существенное

Т а б л и ц а 2

**Скорость потери массы при термодеструкции образцов коры лиственницы: температура максимумов и соответствующие им величины ДТГ при нагревании со скоростью  $10\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$  в окислительной среде**

The rate of mass loss during thermal degradation of larch bark samples: the temperature of the maxima and the corresponding DTG values when heated at a rate of  $10\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  in an oxidizing medium

Образец коры	$t_{\max}$	ДТГ <sub>max</sub>								
НКЛ	77	0,81	314	4,25	459	3,73	656	0,36	–	–
МКЛ	75	0,72	313	4,65	490	4,09	648	0,30	–	–
МКЛ-Cu <sup>2+</sup>	76	0,88	267	3,62	325	16,58	357	2,77	630	0,16

отличие термических свойств МКЛ от НКЛ заключается в скорости потери массы, температуре и величине пика ДТГ в температурном диапазоне от 400 до 580 °С (см. рис. 5).

Образец МКЛ-Cu<sup>2+</sup> кардинально отличается от НКЛ и МКЛ по параметрам термодеструкции (см. рис. 5, табл. 1, 2), что обусловлено адсорбированной медью. Во всем температурном интервале термической конверсии МКЛ-Cu<sup>2+</sup> потеря массы существенно опережает этот показатель для НКЛ и МКЛ. В температурном диапазоне от 200 до 380 °С появляются два четких пика ДТГ: при 265 и 325 °С. «Высота» второго пика более чем в 4 раза превышает величину соответствующих пиков для НКЛ и МКЛ. На ДТГ-кривой в «зоне» разложения лигнина отсутствует экстремум, а на заключительной стадии термодеструкции (от 600 до 650 °С) пик ДТГ для МКЛ-Cu<sup>2+</sup> в 2,3 раза меньше, чем пики для образцов НКЛ и МКЛ, и смещен в низкотемпературную область на 29 град.

Температурный диапазон термического разложения экспериментальных образцов разделен на отдельные участки между точками перегиба и экстремумов на ДТГ-кривой и на соответствующие им величины потери массы по ТГ-кривой (см. рис. 1).

Изменение физико-химических свойств коры, обусловленное модифицированием и адсорбцией Cu<sup>2+</sup>, обнаруживается при анализе ТГ-данных с помощью изоконверсионного метода ОФУ и уравнения Бройдо (рис. 6).

Графики зависимости энергии активации от степени конверсии вещества анализируемых образцов располагаются на разной «высоте» относительно оси абсцисс (рис. 7). Вместе с тем на всех кривых  $E_a = f(\alpha)$  можно выделить по два участка с максимумами (образцы НКЛ и МКЛ) и минимумами (МКЛ-Cu<sup>2+</sup>) при степени конверсии от 0,1 до 0,5 и от 0,5 до 0,8. Существенное снижение энергии активации термической деструкции образца МКЛ-Cu<sup>2+</sup> свидетельствует, по-видимому, о каталитическом действии адсорбированной меди.

«Формальное» использование метода Бройдо для анализа ТГ-данных позволяет дифференци-

Т а б л и ц а 3

**Температурный диапазон и соответствующая ему энергия активации испарения гигроскопической воды и летучих органических веществ при термогравиметрии экспериментальных образцов со скоростью нагрева  $10\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$  в окислительной среде**

The temperature range and the corresponding evaporation energy activation of hygroscopic water and volatile organic substances during thermogravimetry of experimental samples with a heating rate of  $10\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  in an oxidizing environment

Образец коры	Показатель	Гигроскопическая вода	Летучие органические вещества
НКЛ	$E_a$ , кДж/моль	49,6	7,4
	$\Delta t$ , °С	44...74	99...179
МКЛ	$E_a$ , кДж/моль	54,7	7,7
	$\Delta t$ , °С	39...74	94...169
МКЛ-Cu <sup>2+</sup>	$E_a$ , кДж/моль	45,1	6,6
	$\Delta t$ , °С	45...75	100...180

ровать исследованные образцы по эффективным значениям энергии активации (в иностранной литературе часто используется термин «apparent activation energy») на отдельных стадиях термического разложения, идентифицируемых по линейным анаморфозам ТГ-кривых в координатах уравнения Бройдо. Результаты такого анализа однозначно указывают на изменения термических свойств коры, вызванных ее модифицированием и адсорбцией катионов меди.

В качестве примера построены графики (рис. 8) двух участков ТГ-кривой МКЛ в координатах уравнения (2), а также рассчитаны значения энергии активации для всех образцов коры (табл. 3, 4).

Составлены ДСК-кривые экспериментальных образцов (рис. 9) и получены результаты их обработки (табл. 5). Термодинамические параметры окислительной термодеструкции исследованных образцов, по ДСК, свидетельствуют о существенном влиянии модифицирования коры и адсорбции

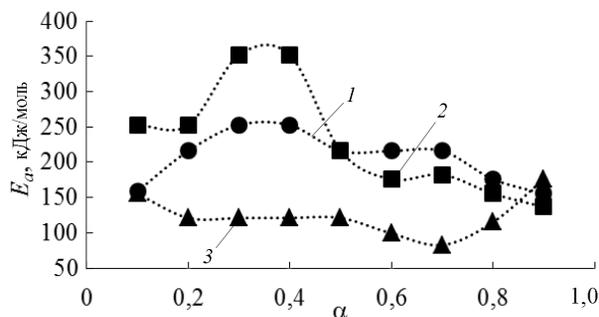


Рис. 7. Зависимость энергии активации  $E_a$  от степени термического разложения  $\alpha$  экспериментальных образцов: 1 — НКЛ, 2 — МКЛ, 3 — МКЛ- $\text{Cu}^{2+}$

Fig. 7. The dependence of the activation energy  $E_a$  on the degree of thermal decomposition  $\alpha$  of the experimental samples: 1 — NKL, 2 — MKL, 3 — MKL- $\text{Cu}^{2+}$

Т а б л и ц а 4

Показатели термической деградации вещества НКЛ, МКЛ и МКЛ- $\text{Cu}^{2+}$ , рассчитанные по уравнению Бройдо

Thermal degradation indicators of the substance NKL, MKL and MKL- $\text{Cu}^{2+}$  calculated according to the Broydo equation

Образец коры	Показатель	Энергия активации и температурные интервалы		
		$E_a$ , кДж/моль	$\Delta t$ , °C	
НКЛ	$E_a$ , кДж/моль	83,0	31,3	105,9
	$\Delta t$ , °C	194...319	335...485	499...559
МКЛ	$E_a$ , кДж/моль	82,2	27,9	68,4
	$\Delta t$ , °C	194...329	359...459	479...539
МКЛ- $\text{Cu}^{2+}$	$E_a$ , кДж/моль	78,0	33,8	—
	$\Delta t$ , °C	200...325	330...500	—

Т а б л и ц а 5

Основные параметры термического разложения образцов коры лиственницы

Main thermal decomposition parameters of larch bark samples

Образец коры	Температурный интервал $\Delta t$ , °C	$Q_{\text{эндо}}$ , Дж·г <sup>-1</sup>	$\Delta t$ , °C	$t_{\text{max}}$ , экзо, °C		$Q_{\text{экзо}}$ , кДж·г <sup>-1</sup>	
НКЛ	40...128	91,4	224...582	389	442	482	15,1
МКЛ	31...122	163	200...585	354	—	499 508	10,1
МКЛ- $\text{Cu}^{2+}$	29...124	279,2	225...563	319 384	451	495 504	13,6

Примечание. Инструментальная погрешность определения теплового эффекта  $Q_{\text{эндо/экзо}}$  не превышала 5%. Выделена температура в точке перегиба ДСК-кривой.

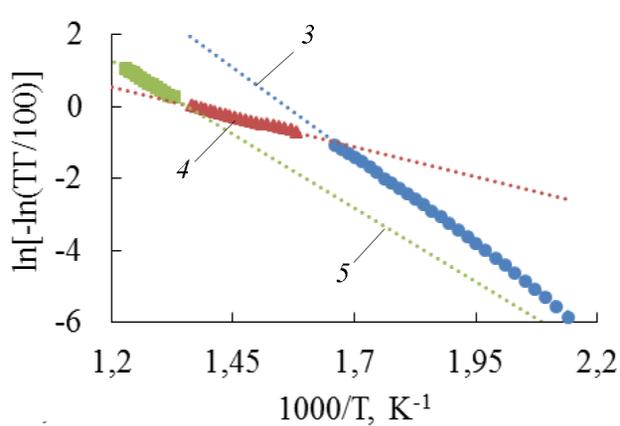
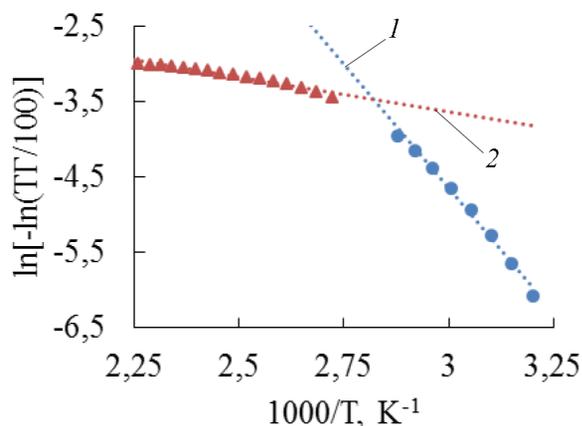


Рис. 8. ТГ-кривые МКЛ в координатах уравнения Бройдо и стадии термического разложения вещества МКЛ, выявляемые с помощью уравнения Бройдо: 1 — испарение воды; 2 — испарение летучих органических веществ; 3–5 — стадии разложения

Fig. 8. TG curves of MKL in the coordinates of the Broydo equation and the stage of thermal decomposition of the substance MKL, detected using the Broydo equation: 1 — evaporation of water; 2 — evaporation of volatile organic substances; 3–5 — decomposition stages

катионов меди на физическое состояние вещества МКЛ и МКЛ- $\text{Cu}^{2+}$ . Изменилось положение точек перегиба и максимумов на ДСК-кривых. Соотношение теплоты испарения влаги из НКЛ, МКЛ и МКЛ- $\text{Cu}^{2+}$  — 1 : 1,8 : 3,1 соответственно также

свидетельствует о влиянии модифицирования коры и адсорбции меди. Значения суммарного теплового эффекта термического разложения МКЛ и МКЛ- $\text{Cu}^{2+}$  отличаются от такового для НКЛ на 33,1 и 9,9 % соответственно.

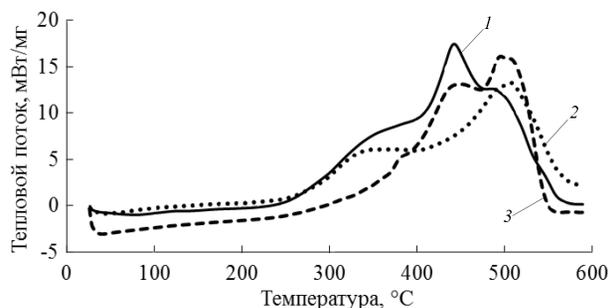


Рис. 9. ДСК исходной (1), модифицированной (2) и модифицированной коры лиственницы после адсорбции  $\text{Cu}^{2+}$  (3) при скорости нагрева  $10\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$  на воздухе

Fig. 9. DSC of the initial (1), modified (2) and modified larch bark after  $\text{Cu}^{2+}$  adsorption (3) at a heating rate of  $10\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  in air

## Выводы

Использование комплекса физико-химических методов — сканирующей электронной микроскопии, термогравиметрии, дифференциальной сканирующей калориметрии, хромато-масс-спектрометрии (метод парофазного пробоотбора) — является эффективным при сравнительном исследовании изменений свойств натуральной и подвергнутой химическому и/или физико-химическому модифицированию коры древесных растений.

По результатам сканирующей электронной микроскопии установлено, что модифицирование коры *Larix sibirica* L. для придания ей катионообменных свойств не приводит к заметному изменению морфолого-анатомического строения. Отмечено лишь удаление большей части оксалата кальция и низкомолекулярных органических веществ из коры модифицирующим раствором. Полученный биосорбент адсорбирует катионы  $\text{Cu}^{2+}$  из водного раствора с образованием агрегатов, содержащих металл, обнаруживаемый с помощью рентгеноспектрального анализатора СЭМ.

На ТГ- и ДТГ-профилях образцов НКЛ и МКЛ в температурном диапазоне  $133\text{...}138\text{...}168\text{...}174\text{ }^\circ\text{C}$  выделяются две стадии потери массы: испарение воды и улетучивание терпеновых углеводородов. В результате модифицирующей обработки нативной коры произошло уменьшение массовой доли идентифицированных моно-терпенов на 54,5 %, сесквитерпенов — на 66,1 и дитерпенов — на 28,3 %, но увеличилась массовая доля кислородсодержащих углеводородов — на 11,7 %. Содержание гигроскопической влаги в МКЛ- $\text{Cu}^{2+}$  возросло в среднем на 27,4 % по сравнению с НКЛ и МКЛ.

Вид ТГ- и ДТГ-кривых термодеструкции вещества НКЛ и МКЛ сходен и характеризуется наличием двух пиков на ДТГ-кривой приблизительно одинаковой высоты, которые соответ-

ствуют термическому разложению полимерных углеводной и ароматической компонент, но отличающихся по температуре. Термогравиметрический «портрет» МКЛ- $\text{Cu}^{2+}$  радикально отличается от соответствующих профилей НКЛ и МКЛ, что, по-видимому, объясняется каталитическим действием адсорбированной меди на процесс термодеструкции образца МКЛ- $\text{Cu}^{2+}$ .

Результаты анализа кинетики термического разложения экспериментальных образцов в рамках моделей ОФУ и Бройдо четко указывают на различия основных параметров протекания термодеструкции (энергии активации, стадийности процесса, температурных диапазонов), обусловленных химическим модифицированием коры и адсорбцией меди.

Данные ДСК показывают, что модифицирование коры и адсорбция меди на полученном биосорбенте обуславливают существенное изменение положения точек перегиба, температуры пиков на ДСК-кривых и значений тепловых эффектов термического разложения исследованных образцов.

*В исследовании использовались аналитические приборы и оборудование Красноярского регионального центра коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН.*

## Список литературы

- [1] Randall J.M., Hautala E., Waiss A.C., Tschernitz J.L. Modified barks as scavengers for heavy metal ions // *Forest Prod. J.*, 1976, v. 26, no. 8, pp. 46–50.
- [2] Fujii M., Shioya S., Ito A. Chemically modified coniferous wood barks as scavengers of uranium from seawater // *Holzforchung*, 1988, v. 4, no. 5, pp. 295–298.
- [3] Лоскутов С.Р., Бутанаева В.Н., Семенович А.В. Сорбционные свойства модифицированной коры *Larix sibirica* L., *Pinus sylvestris* L. и *Abies sibirica* L. по отношению к ионам тяжелых металлов (на примере  $\text{Cu}^{2+}$ ) // *Растительные ресурсы*, 1995. Т. 31. Вып. 4. С. 71–76.
- [4] Seki K., Saito N., Aoyama M. Removal of heavy metal ions from solutions by coniferous barks // *Wood Science and Technology*, 1997, v. 31, iss. 6, pp. 441–447.
- [5] Rypińska I., Biegańska M. Modification of *Salix americana* willow bark for removal of heavy metal ions from aqueous solutions // *Polish J. of Chemical Technology*, 2014, v. 16, pp. 41–44. DOI: 10.2478/pjct-2014-0067
- [6] Su W., Yang Y., Dai H., Jiang L. Biosorption of heavy metal ions from aqueous solution on Chinese fir bark modified by sodium hypochlorite // *BioResources*, 2015, v. 4, no. 4, pp. 6993–7008.
- [7] Şen A., Pereira H., Olivella M.A., Villaescusa I. Heavy metals removal in aqueous environments using bark as a biosorbent // *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 2015, no. 12, pp. 391–404. DOI: 10.1007/s13762-014-0525-z
- [8] Dulman V., Odochian L., Dumitras M., Cucuman S. A study by non-isothermal thermal methods of spruce wood bark materials after their application for dye removal // *J. Serb. Chem. Soc.*, 2005, v. 70, no. 11, pp. 1325–1333.
- [9] Shen D.K., Gua S., Luo K.H., Bridgwater A.V., Fang M.X. Kinetic study on thermal decomposition of woods in oxidative environment // *Fuel*, 2009, v. 88, pp. 1024–1030.

- [10] Cruz G., Crnkovic P.M. Investigation into the kinetic behavior of biomass combustion under  $N_2/O_2$  and  $CO_2/O_2$  atmospheres // *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2016, v. 123, pp. 1003–1011. DOI: 10.1007/s10973-015-4908-2
- [11] Лоскутов С.Р., Шапченкова О.А., Анискина А.А. Термический анализ древесины основных лесообразующих пород средней Сибири // *Сибирский лесной журнал*, 2015. № 6. С. 17–30.
- [12] Tyutkova E.A., Loskutov S.R., Shashkin A.V., Benkova V.E. Thermal analysis of earlywood and latewood of larch (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) found along the Polar tree line. Correlation of wood destruction values with climatic factors // *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2017, v. 130, pp. 1391–1397. DOI: 10.1007/s10973-017-6550-7
- [13] Shangguan W., Chen Z., Zhao J., Song X. Thermogravimetric analysis of cork and cork components from *Quercus variabilis* // *Wood Sci. Technol.*, 2018, v. 52, pp. 181–192. DOI: 10.1007/s00226-017-0959-9
- [14] Broido A.A. Simple, sensitive graphical methods of treating thermogravimetric analysis data // *J. Polym. Sci. Part A-2.*, 1969, v. 7, no. 10, pp. 1761–1773.
- [15] Ozawa, T.A. New method of analyzing thermogravimetric data // *Chem. Soc. Jpn.*, 1965, v. 38, no. 11, pp. 1881–1886.
- [16] Poletto M., Dettenborn J., Pistor V., Zeni M., Zattera F.J. Materials Produced from Plant Biomass. Part I: Evaluation of Thermal Stability and Pyrolysis of Wood // *Materials Research*, 2010, v.13, no. 3, pp. 375–379.
- [17] Haykiri-Acma H., Yaman S. Comparison of the combustion behaviors of agricultural wastes under dry air and oxygen // *World Renewable Energy Congress. Linköping. Sweden. 8–13 May. Bioenergy Technology*, 2011, pp. 251–257.
- [18] Souzaa A.R., Cavassanb O., Almeidaa M.V., Legendrea A.O., Bannacha G. Flame retardant properties of the bark powder of *Anadenanthera peregrina* var. *falcata* (Benth.) Altschul (angico) studied by coupled thermogravimetry–Fourier transform infrared spectroscopy // *J. of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2014, v. 106, pp. 187–189.
- [19] Brostow W., Menard K.P., Menard N. Combustion properties of several species of wood // *Chem. Chem. Technol.*, 2009, v. 3, no. 3, pp. 173–176.
- [20] Emandi A., Vasiliu C.I., Budrugaec P., Stsmatin I. Quantitative investigation of wood composition by integrated FT-IR and thermogravimetric methods // *Cellulose Chem. Technol.*, 2011, v. 45, no. 9 (10), pp. 579–584.
- [21] Sebío-Puñal T., Naya S., López-Beceiro J., Tarrío-Saavedra J., Artiaga R. Thermogravimetric analysis of wood, hemicellulose, and lignin from five wood species // *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2012, v. 109, pp. 1163–1167. DOI: 10.1007/s10973-011-2133-1
- [22] Fang P., McGinnis G.D., Parish E.J. Thermogravimetric analysis of loblolly pine bark components // *Wood and Fiber*, 1975, v. 7, no. 2, pp. 136–145.
- [23] Gaugler M., Grigsby W.J. Thermal degradation of condensed tannins from radiata pine bark // *J. Wood Chemistry and Technology*, 2009, v. 29, no. 4, pp. 305–321. DOI: 10.1080/02773810903165671
- [24] Эззу К. Анатомия семенных растений. М.: Мир, 1980. 400 с.
- [25] Еремин В.М. Анатомия коры видов рода *Larix* (*Pinaceae*) Советского Союза // *Бот. журн.*, 1981. Т. 66. Вып. 11. С. 1595–1605.
- [26] Еремин В.М., Чавчавадзе Е.С. Анатомия вегетативных органов сосновых (*Pinaceae* Lindl.). ИМГиГ ДВО РАН, БИН РАН. Брест: Полиграфика, 2015. 692 с.
- [27] Лотова Л.И. Анатомия коры хвойных. М.: Наука, 1987. 152 с.
- [28] Левин Э.Д., Астапкович И.И., Рязанова Т.В. Экстракция коры лиственницы сибирской спиртовыми растворами щелочи // *Химия древесины*, 1980. № 4. С. 93–97.
- [29] Semenovich A.V., Shapchenkova O.A., Aniskina A.A., Loskutov S.R. Removal of  $Cu^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cr^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$  and  $Ni^{2+}$  cations from aqueous solutions by modified bark // *Bulletin of Altai state agrarian University*, 2016, v. 14, no. 1, pp. 76–81.
- [30] Mamleev V., Dourbigot S., Le Bras M., Lefebvre J. Three model-free methods for calculation of activation energy in TG // *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2004, v. 78, pp. 1009–1027.
- [31] Wendlandt W.W. *Thermal Methods of Analysis*. New York: Wiley, 1964, 424 p.
- [32] Liu A.N., Fan W.C., Lin Q.Z. Thermogravimetric analysis on global mass loss kinetics of leaf, bark and wood pyrolysis in air atmosphere // *Fire safety science*, 2001, v. 10, no. 3, pp. 125–134.
- [33] Gao M., Sun C. Y., Wang C. X. Thermal degradation of wood treated with flame-retardants // *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2006, v. 85, no. 3, pp. 765–769.
- [34] Muralidhara K.S., Sreenivasan S. Thermal degradation kinetic data of polyester, cotton and polyester-cotton blended textile material // *World Appl. Sci. J.*, 2010, v. 11, no. 2, pp. 184–189.
- [35] Saiyed B.A. The study of thermal stability and decomposition in cadmium oxalate single crystals // *IJERT*, 2012, v. 1, iss. 8, pp. 1–5.

## Сведения об авторах

**Лоскутов Сергей Реджинальдович** — д-р хим. наук, академик ИАВС, Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН — Обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, [lsr@ksc.krasn.ru](mailto:lsr@ksc.krasn.ru)

**Петрунина Елена Александровна** — инженер, Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН — Обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, [petrunina@ksc.krasn.ru](mailto:petrunina@ksc.krasn.ru)

**Шапченкова Ольга Александровна** — канд. биол. наук, ст. науч. сотр., Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН — Обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, [sholga@ksc.krasn.ru](mailto:sholga@ksc.krasn.ru)

**Пляшечник Мария Анатольевна** — науч. сотр., Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН — Обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, [lilwood@ksc.krasn.ru](mailto:lilwood@ksc.krasn.ru)

**Стасова Виктория Викторовна** — канд. биол. наук, ст. науч. сотр., Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН — Обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, [vistasova@mail.ru](mailto:vistasova@mail.ru)

Поступила в редакцию 30.09.2019.

Принята к публикации 20.01.2020.

## PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF NATURAL, CHEMICALLY MODIFIED, AND POST- HEAVY-METAL- CATION-ADSORPTION SIBERIAN LARCH BARK

S.R. Loskutov, E.A. Petrunina, O.A. Shapchenkova, M.A. Plyashechnik, V.V. Stasova

Sukachev Institute of Forest SB RAS, Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center» SB RAS, 50/28, Akademgorodok, 660036, Krasnoyarsk, Russia

petrunina@ksc.krasn.ru

This paper is focused on a comparative analysis of natural Siberian larch bark physical and chemical properties with those obtained after the bark was chemically modified to make it capable of exchanging cations, and after it was used to adsorb copper cations from copper sulfate water solutions of various concentrations. To visualize sample microstructure, we used a scanning electron microscope. The modification resulted in neither morphological, nor anatomical changes of the bark. Adsorption of  $\text{Cu}^{2+}$  cations from a water solution by the biosorbent obtained was accompanied by the occurrence of aggregates on its particle surfaces. The microscope x-ray analyzer helped reveal the aggregates to contain copper. We applied gas chromatography-mass-spectrometry to analyze the modification-induced changes in the composition of the bark volatile components, such as mono- and sesquiterpenes, diterpenes and oxygen-containing hydrocarbons, by the vapor-phase sampling method. Analyzing the results of thermogravimetry in an oxidizing atmosphere enabled to determine the temperature ranges of some stages of sample thermal decomposition and the corresponding sample weight loss and its rate at programmed heating (TG/DTG). A kinetic analysis of the thermogravimetry data was done using Ozawa-Flynn-Wall isoconversion method and Broido's method. The activation energy values calculated based on the degrees of conversion resulting from Ozawa-Flynn-Wall method and from Broido's graphs allowed us to differentiate samples whose thermal properties changed due to chemical modification from those with metal cation adsorption-induced changes of the properties. Our differential scanning calorimetry experiments revealed that thermal effects that occurred in the process of sample oxidative thermal degradation when heated at  $10\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  in 25 to 700  $^\circ\text{C}$  temperature range changed, compared to the natural bark state, as a result of chemical modification of the bark, or by heavy metal ( $\text{Cu}^{2+}$ ) sorption.

**Keywords:** Siberian larch natural bark, modified bark (heavy metal biosorbent), thermal analysis, scanning electron microscopy, chromato-mass-spectrometry, physicochemical properties

**Suggested citation:** Loskutov S.R., Petrunina E.A., Shapchenkova O.A., Plyashechnik M.A., Stasova V.V. *Fiziko-khimicheskie pokazateli kory listvennitsy sibirskoy: natural'noy, khimicheskii modifitsirovannoy i posle adsorbtsii kationov tyazhelykh metallov* [Physicochemical properties of natural, chemically modified, and post- heavy-metal-cation-adsorption Siberian Larch Bark]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 2, pp. 98–110. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-98-110

### References

- [1] Randall J.M., Hautala E., Waiss A.C., Tschernitz J.L. Modified barks as scavengers for heavy metal ions. *Forest Prod. J.*, 1976, v. 26, no. 8, pp. 46–50.
- [2] Fujii M., Shioya S., Ito A. Chemically modified coniferous wood barks as scavengers of uranium from seawater. *Holzfor-schung*, 1988, v. 4, no. 5, pp. 295–298.
- [3] Loskutov S.R., Butanaeva V.N., Semenovich A.V. *Sorbtsionnye svoystva modifitsirovannoy kory Larix sibirica L., Pinus sylvestris L. i Abies sibirica L. po otnosheniyu k ionam tyazhelykh metallov (na primere  $\text{Cu}^{2+}$ )* [Sorption properties of the modified bark Larix sibirica L., Pinus sylvestris L. and Abies sibirica L. with respect to heavy metal ions (for example,  $\text{Cu}^{2+}$ )]. *Rastitel'nye resursy* [Plant resources], 1995, v. 31, iss. 4, pp. 71–76.
- [4] Seki K., Saito N., Aoyama M. Removal of heavy metal ions from solutions by coniferous barks. *Wood Science and Technol-ogy*, 1997, v. 31, iss. 6, pp. 441–447.
- [5] Rypińska I., Biegańska M. Modification of Salix americana willow bark for removal of heavy metal ions from aqueous solu-tions. *Polish J. Chemical Technology*, 2014, v. 16, pp. 41–44. DOI: 10.2478/pjct-2014-0067
- [6] Su W., Yang Y., Dai H., Jiang L. Biosorption of heavy metal ions from aqueous solution on Chinese fir bark modified by sodi-um hypochlorite. *BioResources*, 2015, v. 4, no. 4, pp. 6993-7008.
- [7] Şen A., Pereira H., Olivella M.A., Villaescusa I. Heavy metals removal in aqueous environments using bark as a biosorbent. *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 2015, no. 12, pp. 391–404. DOI: 10.1007/s13762-014-0525-z
- [8] Dulman V., Odochian L., Dumitras M., Cucuman S. A study by non-isothermal thermal methods of spruce wood bark materi-als after their application for dye removal. *J. Serb. Chem. Soc.*, 2005, v. 70, no. 11, pp. 1325–1333.
- [9] Shen D.K., Gua S., Luo K.H., Bridgwater A.V., Fang M.X. Kinetic study on thermal decomposition of woods in oxidative environment. *Fuel*, 2009, v. 88, pp.1024–1030.
- [10] Cruz G., Crnkovic P.M. Investigation into the kinetic behavior of biomass combustion under  $\text{N}_2/\text{O}_2$  and  $\text{CO}_2/\text{O}_2$  atmospheres. *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2016, v. 123, pp. 1003–1011. DOI: 10.1007/s10973-015-4908-2
- [11] Loskutov S.R., Shapchenkova O.A., Aniskina A.A. *Termicheskiy analiz drevesiny osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod sredney Sibiri* [Thermal analysis of wood of the main tree species of central Siberia]. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* [Siberian Forest Journal]. 2015, no. 6, pp. 17–30.
- [12] Tyutkova E.A., Loskutov S.R., Shashkin A.V., Benkova V.E. Thermal analysis of earlywood and latewood of larch (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) found along the Polar tree line. Correlation of wood destruction values with climatic factors. *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2017, v. 130, pp. 1391–1397. DOI: 10.1007/s10973-017-6550-7
- [13] Shangguan W., Chen Z., Zhao J., Song X. Thermogravimetric analysis of cork and cork components from *Quercus variabilis*. *Wood Sci. Technol.*, 2018, v. 52, pp. 181–192. DOI: 10.1007/s00226-017-0959-9

- [14] Broido A.A. Simple, sensitive graphical methods of treating thermogravimetric analysis data. *J. Polym. Sci. Part A-2.*, 1969, v. 7, no. 10, pp. 1761–1773.
- [15] Ozawa, T.A. New method of analyzing thermogravimetric data. *Chem. Soc. Jpn.*, 1965, v. 38, no. 11, pp. 1881–1886.
- [16] Poletto M., Dettenborn J, Pistor V., Zeni M., Zattera F.J. Materials Produced from Plant Biomass. Part I: Evaluation of Thermal Stability and Pyrolysis of Wood. *Materials Research*, 2010, v.13, no. 3, pp. 375–379.
- [17] Haykiri-Acma H., Yaman S. Comparison of the combustion behaviors of agricultural wastes under dry air and oxygen. *World Renewable Energy Congress. Linköping. Sweden. 8–13 May. Bioenergy Technology*, 2011, pp. 251–257.
- [18] Souza A.R., Cavassanb O., Almeida M.V., Legendrea A.O., Bannacha G. Flame retardant properties of the bark powder of *Anadenanthera peregrina* var. *falcata* (Benth.) Altschul (angico) studied by coupled thermogravimetry–Fourier transform infrared spectroscopy. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2014, v. 106, pp. 187–189.
- [19] Brostow W., Menard K.P., Menard N. Combustion properties of several species of wood. *Chem. Chem. Technol.*, 2009, v. 3, no. 3, pp. 173–176.
- [20] Emandi A., Vasiliu C.I., Budruga P., Stsatin I. Quantitative investigation of wood composition by integrated FT-IR and thermogravimetric methods. *Cellulose Chem. Technol.*, 2011, v. 45, no. 9 (10), pp. 579–584.
- [21] Sebío-Puñal T., Naya S., López-Beceiro J., Tarrío-Saavedra J., Artiaga R. Thermogravimetric analysis of wood, holocellulose, and lignin from five wood species. *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2012, v. 109, pp. 1163–1167. DOI: 10.1007/s10973-011-2133-1
- [22] Fang P., McGinnis G.D., Parish E.J. Thermogravimetric analysis of loblolly pine bark components. *Wood and Fiber*, 1975, v. 7, no. 2, pp. 136–145.
- [23] Gaugler M., Grigsby W.J. Thermal degradation of condensed tannins from radiata pine bark // *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 2009, v. 29, no. 4, pp. 305–321. DOI: 10.1080/02773810903165671
- [24] Ezau K. *Anatomiya semennykh rasteniy* [Anatomy of seed plants]. Moscow: Mir, 1980, 400 p.
- [25] Eremin V.M. *Anatomiya kory vidov Larix (Pinaceae) Sovetskogo Soyuz* [Anatomy of the cortex of species of the genus *Larix* (Pinaceae) of the Soviet Union]. *Botanicheskiy zhurnal* [Botanical journal]. 1981, v. 66, iss. 11, pp. 1595–1605.
- [26] Eremin V.M., Chavchavadze E.S. *Anatomiya vegetativnykh organov Sosnovykh (Pinaceae Lindl.)* [Anatomy of Pine's Vegetative Organs (Pinaceae Lindl.)]. IMGiG DVO RAN, BIN RAN [IMGiG FEB RAS, BIN RAS]. Brest: Poligrafika, 2015, 692 p.
- [27] Lotova L.I. *Anatomiya kory khvoynnykh* [Coniferous bark anatomy]. Moscow: Nauka, 1987, 152 p.
- [28] Levin E.D., Astapkovich I.I., Ryazanova T.V. *Ekstraktsiya kory listvennitsy sibirskoy spirtovymi ras-tvorami shchelochi* [Extraction of larch bark of Siberian alcohol solutions of alkali]. *Khimiya drevesiny* [Wood chemistry]. 1980, no. 4, pp. 93–97.
- [29] Semenov A.V., Shapchenkova O.A., Aniskina A.A., Loskutov S.R. Removal of  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  and  $\text{Ni}^{2+}$  cations from aqueous solutions by modified bark. *Bulletin of Altai state agrarian University*, 2016, v. 14, no. 1, pp. 76–81.
- [30] Mamleev V., Dourbigot S., Le Bras M., Lefebvre J. Three model-free methods for calculation of activation energy in TG. *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2004, v. 78, pp. 1009–1027.
- [31] Wendlandt W.W. *Thermal Methods of Analysis*. Wiley, New York, 1964, 424 p.
- [32] Liu A.N., Fan W.C., Lin Q.Z. Thermogravimetric analysis on global mass loss kinetics of leaf, bark and wood pyrolysis in air atmosphere. *Fire safety science*, 2001, v. 10, no. 3, pp. 125–134.
- [33] Gao M., Sun C. Y., Wang C. X. Thermal degradation of wood treated with flame-retardants. *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2006, v. 85, no. 3, pp. 765–769.
- [34] Muralidhara K.S., Sreenivasan S. Thermal degradation kinetic data of polyester, cotton and polyester-cotton blended textile material. *World Appl. Sci. J.*, 2010, v. 11, no. 2, pp. 184–189.
- [35] Saiyed B.A. The study of thermal stability and decomposition in cadmium oxalate single crystals. *IJERT*, 2012, v. 1, iss. 8, pp. 1–5.

## Authors' information

**Loskutov Sergey Redzhinaldovich** — Dr. Sci. (Chemistry), Fellow of the IAWS, Sukachev Institute of Forest SB RAS, Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center» SB RAS, lsr@ksc.krasn.ru

**Petrulina Elena Alexandrovna** — Engineer, Sukachev Institute of Forest SB RAS, Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center» SB RAS, petrunina@ksc.krasn.ru

**Shapchenkova Olga Aleksandrovna** — Cand. Sci. (Biology), Senior Scientist, Sukachev Institute of Forest SB RAS, Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center» SB RAS, sholga@ksc.krasn.ru

**Plyashechnik Maria Anatolyevna** — Staff Scientist, Sukachev Institute of Forest SB RAS, Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center» SB RAS, lilwood@ksc.krasn.ru

**Stasova Victoria Viktorovna** — Cand. Sci. (Biology), Senior Scientist, Sukachev Institute of Forest SB RAS, Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center» SB RAS, vistasova@mail.ru

Received 30.09.2019.

Accepted for publication 20.01.2020.

## ИЗУЧЕНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ЛИГНИНА КАМНЕЛОМКИ СУПРОТИВНОЛИСТНОЙ (*SAXIFRAGA OPPOSITIFOLIA* L.) МЕТОДАМИ ИК- И ЯМР-СПЕКТРОСКОПИИ

А.В. Фалёва, А.В. Белесов, А.Ю. Кожевников

ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), Центр коллективного пользования научным оборудованием «Арктика», 163002, Россия, г. Архангельск, Наб. Северной Двины, д. 17

a.bezumova@narfu.ru

Впервые проведены исследования химической структуры лигнина, выделенного из растения рода Камнеломка. С помощью современных физико-химических методов, а также данных элементного анализа, получены сведения о его строении и химическом составе. По данным ИК-спектроскопии, подтверждена лигниновая ароматическая природа полученного образца. По результатам спектроскопии  $^{13}\text{C}$ - и  $^{31}\text{P}$ -ЯМР, рассчитано содержание основных функциональных групп. Рассчитана развернутая эмпирическая формула фенилпропанового структурного звена. В результате получен образец лигнина, который характеризуется низким содержанием метоксильных групп (0,19/C<sub>9</sub>) и в тоже время значительным количеством свободных фенольных и алифатических гидроксильных групп (0,53/C<sub>9</sub>), что не позволяет отнести его ни с одним ранее исследованным лигнином. По количественному соотношению основных фенилпропановых единиц лигнин камнеломки также заметно отличается от исследуемых ранее лигнинов. На основании проведенной двумерной спектроскопии ядерного магнитного резонанса установлено, что в химической структуре исследуемого образца присутствуют преимущественно единицы гваяцильного (G) и *n*-кумарового (H) типа с небольшим количеством сингильных (S) единиц. Полученные данные указывают на принадлежность исследуемого лигнина к GH-типу. Соотношение S:G:H составило 0,21:1,00:1,01. В качестве основных типов связей, характерных для структуры лигнина, следует отметить β-O-4 (7,1/100C<sub>9</sub>) и α-O-4 (0,88/100C<sub>9</sub>), участвующих в формировании структур β-арилового эфира и фенилкумарона соответственно. Предполагается, что в структуре лигнина камнеломки фенилпропановые единицы *n*-кумарового типа не участвуют в образовании простых эфирных связей, а формируют макромолекулу лигнина за счет образования углерод-углеродных связей и также могут участвовать в образовании сложноэфирных связей с фрагментами жирных кислот.

**Ключевые слова:** травянистые растения, лигнин, химическая структура, спектроскопия

**Ссылка для цитирования:** Фалёва А.В., Белесов А.В., Кожевников А.Ю. Изучение химической структуры лигнина камнеломки супротивнолистной (*Saxifraga oppositifolia* L.) методами ИК- и ЯМР-спектроскопии // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 2. С. 111–118. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-111-118

Лигнин является структурным компонентом всех высших растений и определяется как сложный биополимер, построенный из фенилпропановых единиц (ФПЕ), полученных в результате окислительных реакций соединения одного-трех типов гидроксикоричных спиртов (кумарового, кониферилового и синапового). Соответствующие мономерные единицы обозначаются как *n*-гидросифенил (H), гваяцил (G) и сингил (S) [1].

Благодаря значительному природному содержанию, а также своей неоднородности и большому разнообразию фрагментов лигнины привлекли внимание многих исследователей. Большинство работ направлено на исследование лигнинов древесных пород в связи с их вовлеченностью в технологию целлюлозно-бумажного производства. Однако за последние десятилетия возрос и интерес к исследованию лигнинов травянистых растений, в частности, накоплен значительный объем данных о лигнинах злаковых культур (однодольные растения) [2, 3]. Это связано с тем, что солома злаков является крупнотоннажным отходом сельскохозяйственного производства и благодаря значительному содержанию лигнина может служить

перспективным сырьем для получения широко спектра низкомолекулярных веществ. Лигнинам двудольных травянистых растений уделено меньше внимания [4–6]. Ориентируясь на тот факт, что химическая структура лигнина весьма переменчива и во многом зависит от ботанического происхождения растения, выявление особенностей его химического строения на разных уровнях ботанической иерархии представляет значительный интерес.

### Цель работы

В данной работе исследован лигнин, выделенный из растения рода Камнеломка. Вид Камнеломка супротивнолистная (*Saxifraga oppositifolia* L.) представляет собой многолетнее травянистое растение с ползучими стеблями длиной до 15 см и является одним из самых северных видов цветковых растений. Лигнин растений, произрастающих в арктической зоне, может значительно отличаться от лигнина других растений в силу климатических особенностей условий произрастания. Результаты, полученные авторами данной работы, могут внести вклад в систематику лигнинов, в зависимости от их ботанической принадлежности, а

также в разработку критериев соответствия малоизмененных лигнинов определенным классам, близким по химической структуре и свойствам.

**Объекты и методы исследования**

Сырьем для получения препарата лигнина послужили стебли растения камнеломка супротивнолистная (*Saxifraga oppositifolia* L.), собранные в районе пос. Пирамида — на о-ве Западный Шпицберген архипелага Шпицберген (координаты 78 39.321 N, 16 17.222 E).

**Экстракция и очистка.** Предварительная подготовка заключалась в измельчении стеблей до состояния муки и в последующей экстракции ацетоном в аппарате Сокслета в течение 48 ч для удаления экстрактивных веществ. Препарат лигнина получали по методу Пеппера [7], экстрагируя растительное сырье смесью диоксан — вода (9:1) в присутствии соляной кислоты (0,7 %) на водяной бане при температуре 94...96 °С в течение 2 ч. Для удаления остаточных полисахаридов и прочих растворимых загрязняющих веществ полученный препарат подвергали очистке путем переосаждения из диоксана в диэтиловый эфир.

**ИК-спектроскопия.** Запись инфракрасных спектров (ИК-спектров) проводилась на ИК-Фурье-спектрометре Vertex 70 (Bruker, Германия) с помощью приставки однократного нарушенного полного внутреннего отражения GladiATR (PikeTech., США) с алмазной призмой. Условия записи спектров:

- Диапазон, см<sup>-1</sup> ..... от 4000 до 400
- Разрешение, см<sup>-1</sup> ..... 4
- Параллельные сканирования образца ..... 128

**Элементный анализ.** Элементный анализ проводили на анализаторе CHNS EA-3000 (Euro

Vector, Италия). Содержание кислорода рассчитывали следующим образом (%): O = 100 – (C + H). Расчет эмпирической формулы структурной единицы лигнина проводился в соответствии со стандартной методикой [8].

**ЯМР-спектроскопия.** Все спектры ядерного магнитного резонанса (ЯМР-спектры) регистрировали при температуре 298 К в ампулах диаметром 5 мм на спектрометре Bruker AVANCE III 600 (Германия) с рабочей частотой для протонов 600 МГц. При регистрации ЯМР-спектров добавлением трис-ацетил-ацетоната хрома (III) с концентрацией 5 мг/мл искусственно уменьшалось время релаксации. Интегрирование сигналов осуществлялось с использованием программного обеспечения спектрометра «TopSpin 3.2», интерпретация — по литературным данным [4, 9–11] и с помощью программного пакета ACD/Labs® (ACD/SpectrumProcessor 2015, version 2014, Advanced Chemistry Development, Inc., Toronto, ON, Canada, www.acdlabs.com.).

**<sup>31</sup>P-ЯМР.** Данный вид ЯМР-спектроскопии используется для оценки содержания свободных гидроксильных (ОН-групп) и карбоксильных СООН-групп в исследуемом образце лигнина. Предварительно проводится процедура дериватизации с соответствующим фосфитилирующим реагентом — 2-хлор-4,4,5,5-тетраметил-1,3,2-диоксафосфоланом, который в присутствии органического основания, такого как пиридин, реагирует с ОН-группами в лигнине (алифатическими, фенольными и СООН-группами карбоновых кислот) с образованием фосфитилированных продуктов (рис. 1).

Дериватизацию образца, а также подбор экспериментальных параметров проводили на основе

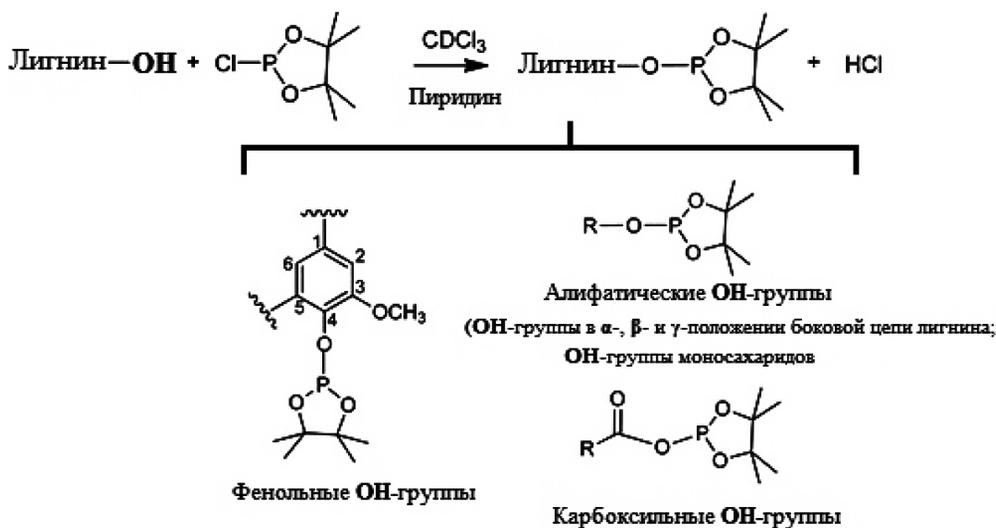


Рис. 1. Фосфитилирование ОН-групп структурных единиц лигнина камнеломки супротивнолистной  
 Fig. 1. Phosphitylation OH-groups of Mountain saxifrage lignin structural units

данных, изложенных в работах [11–13]. Калибровка спектров осуществлялась по сигналу ЯМР фосфитилирующего реагента ( $\delta_p \sim 132,2$  м.д.) [11]. В качестве внутреннего стандарта использовался N-гидрокси-5-норборнен-2,3-дикарбоксимид. Расчет содержания свободных гидроксильных и карбоксильных групп проводили на основе данных изложенных в работах [12, 13], по следующим формулам:

$$C_{\text{ОН(СООН)}} = \frac{I_{\text{ОН(СООН)}} \cdot m_{\text{IS}} \cdot 1000}{I_{\text{IS}} \cdot M_{\text{IS}} \cdot m_L}, \text{ (ммоль/г)},$$

или

$$C_{\text{ОН(СООН)}} = \frac{I_{\text{ОН(СООН)}} \cdot m_{\text{IS}} \cdot M_{\text{ОН(СООН)}}}{I_{\text{IS}} \cdot M_{\text{IS}} \cdot m_L} \cdot 100, \text{ (мас. \%)},$$

где  $I_{\text{ОН(СООН)}}$  — интегральная интенсивность сигнала соответствующих ОН- или СООН-групп;

$I_{\text{IS}}$  — интегральная интенсивность внутреннего стандарта;

$m_{\text{IS}}$  — масса внутреннего стандарта, г;

$m_L$  — масса лигнина, г;

$M_{\text{ОН(СООН)}}$  — масса ОН-группы (СООН-группы), г/моль.

**$^{13}\text{C}$ -ЯМР.** Для регистрации спектра  $^{13}\text{C}$ -ЯМР около 50 мг лигнина растворяли в 0,5 мл DMSO- $d_6$ . Спектры  $^{13}\text{C}$ -ЯМР регистрировались с использованием последовательности zgig30 (из стандартной библиотеки Bruker), что позволило проводить количественный анализ и сравнивать интенсивности сигнала, используя параметры:

Длительность импульса, мкс ..... 12

Время регистрации, с ..... 1,4

Время задержки между импульсами, с ..... 2

Число точек при накоплении ..... 64000

Число сканирований ..... ~ 16000

Ширина спектрального диапазона составила 238 м.д. Сигнал растворителя использовался в качестве внутреннего стандарта ( $\delta_C/\delta_H$  39,5/2,5 м.д.). Содержание метоксильных групп (ОСН<sub>3</sub>-групп)  $C_{\text{ОСН}_3}$  (мас. %) определяли по методике, представленной в работе [14], используя относительное содержание атомов углерода ОСН<sub>3</sub>-групп и данные элементного анализа:

$$C_{\text{ОСН}_3} = \frac{I_{\text{ОСН}_3} \cdot [C] \cdot M_{\text{ОСН}_3}}{I_{\text{общ}} \cdot 12},$$

где  $I_{\text{ОСН}_3}$  — интегральная интенсивность сигнала ОСН<sub>3</sub>-групп ( $\delta_C$  55,5 м.д.);

$I_{\text{общ}}$  — общая интегральная интенсивность атомов углерода в спектре;

[C] — доля атомов углерода по данным элементного анализа, %;

$M_{\text{ОСН}_3}$  — масса ОСН<sub>3</sub>-групп, г/моль.

**2D-ЯМР.** Ампулы с образцом, подготовленным для регистрации спектров  $^{13}\text{C}$ -ЯМР, в дальнейшем использовались для регистрации [ $^1\text{H}$ - $^{13}\text{C}$ ] HSQC-спектра (heteronuclear single quantum coherence):

Ширина спектра в измерении  $^1\text{H}$ , м.д. .... 15

Ширина спектра в измерении  $^{13}\text{C}$ , м.д. ... 238

Число точек ..... 1024 × 256

Число накоплений на одну точку, скан ..... 32

Задержка, с ..... 2

Количественный анализ основных типов связей, а также соотношение ФПЕ определяли комбинированным методом, применяя соответствующие сигналы на спектрах [ $^1\text{H}$ - $^{13}\text{C}$ ] HSQC и  $^{13}\text{C}$ -ЯМР [10, 15].

## Результаты и обсуждение

Полученный по методу Пеппера препарат лигнина представляет собой порошок темно-коричневого цвета с незначительным выходом — 0,4 % относительно массы исходного сырья. Согласно данным элементного анализа ( $\text{C}_{60,48}\text{H}_{7,39}\text{O}_{32,13}$ ), исследуемый образец характеризуется высоким содержанием кислородсодержащих структурных единиц и сравнительно низким — углерода. Доказательством лигнинной природы полученного вещества служит его ИК-спектр.

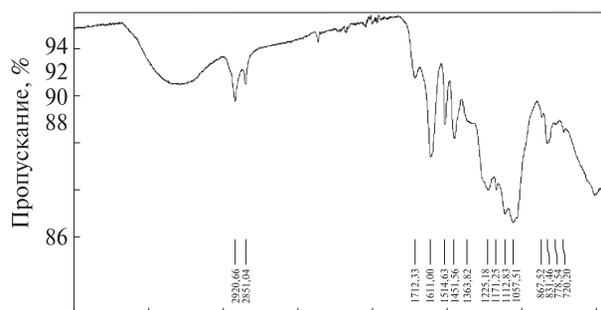
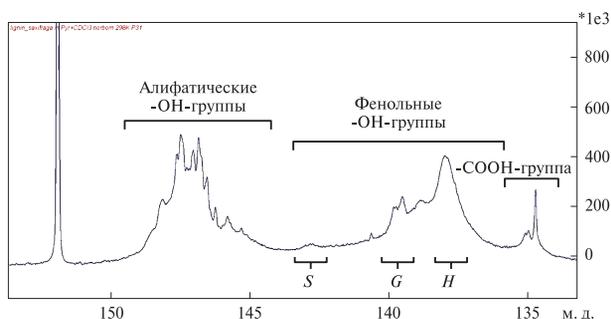


Рис. 2. ИК-спектр лигнина камнеломки супротивнолистной  
Fig. 2. The IR spectrum of lignin Mountain saxifrage

Как видно из рис. 2, ИК-спектр выделенного образца содержит полосы поглощения, характерные как для лигнина, так и для полисахаридов, свидетельствующие о том, что исследуемый образец представляет собой лигноуглеводный комплекс. Наличие в ИК-спектре полосы при длине волны 1171  $\text{cm}^{-1}$  подтверждает преобладание G-единиц в выделенном препарате. Две полосы характерные для колебаний ароматических колец, — на длинах волны 867 и 831  $\text{cm}^{-1}$  — показывают внеплоскостные колебания в 2-м, 5-м и 6-м положении G-единиц. Присутствие в спектре полосы поглощения при 1712  $\text{cm}^{-1}$  соответствует колебаниям связей С=О в несопряженных кетонах, а также карбонильных и сложноэфирных групп в углеводах, в то время как полоса поглоще-



**Рис. 3.** Спектр <sup>31</sup>P-ЯМР лигнина камнеломки супротивнолистной после фосфотилирования  
**Fig. 3.** Spectrum <sup>31</sup>P-NMR of Mountain saxifrage after phospholation

Т а б л и ц а 1

**Количество функциональных групп по данным спектров <sup>13</sup>C и <sup>31</sup>P-ЯМР**  
**The number of functional groups according to the data of <sup>13</sup>C and <sup>31</sup>P-NMR spectra**

Функциональные группы	C, ммоль/г	C, масс. %
ОСН <sub>3</sub> -группы	–	3,31
Алифатические ОН-группы	2,91	4,95
Фенольные ОН-группы	2,89	4,91
СООН-группы	0,31	0,52

Т а б л и ц а 2

**Сравнение эмпирической формулы структурного звена лигнина камнеломки супротивнолистной и формул лигнинов хлопчатника и алтея розового, рассчитанных аналогичным способом**

**Comparison of the empirical formula of the structural link of Mountain saxifrage lignin and the formulas of cotton and rose mallow lignin, calculated in a similar way**

Образец препарата лигнина	Развернутая эмпирическая формула
Камнеломка	C <sub>9</sub> H <sub>11,8</sub> O <sub>2,37</sub> (OCH <sub>3</sub> ) <sub>0,19</sub> (OH <sub>ф</sub> ) <sub>0,53</sub> (OH <sub>ал</sub> ) <sub>0,53</sub> (OOH <sub>COOH</sub> ) <sub>0,021</sub>
Хлопчатник [5]	C <sub>9</sub> H <sub>6,22</sub> O <sub>1,21</sub> (OCH <sub>3</sub> ) <sub>0,82</sub> (OH <sub>ф</sub> ) <sub>0,63</sub> (OH <sub>ал</sub> ) <sub>0,88</sub> (O <sub>CO</sub> ) <sub>0,46</sub> (OOH <sub>COOH</sub> ) <sub>0,17</sub> (O <sub>ар-ал</sub> ) <sub>0,37</sub>
Алтей розовый [5]	C <sub>9</sub> H <sub>6,55</sub> O <sub>0,99</sub> (OCH <sub>3</sub> ) <sub>1,15</sub> (OH <sub>ф</sub> ) <sub>0,31</sub> (OH <sub>ал</sub> ) <sub>0,85</sub> (O <sub>CO</sub> ) <sub>0,30</sub> (OOH <sub>COOH</sub> ) <sub>0,03</sub> (O <sub>ар-ал</sub> ) <sub>0,69</sub>

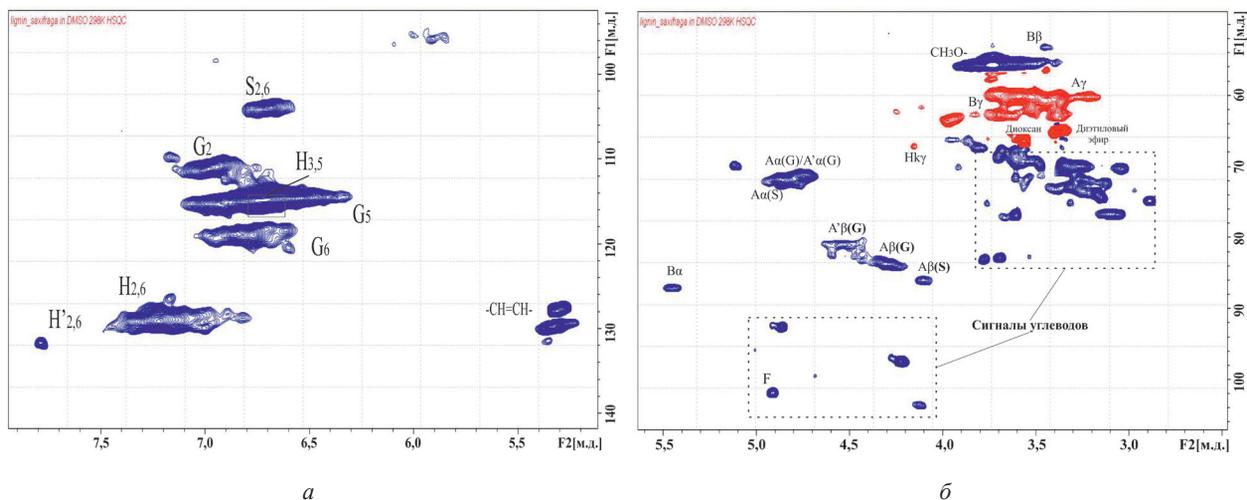
ния 1057 см<sup>-1</sup> соответствует колебаниям С–О–С связей. Это позволяет сделать предположение о наличии гемилцеллюлоз в выделенном препарате. Полосы, наблюдаемые при длинах волны 2920 см<sup>-1</sup> и 2851 см<sup>-1</sup>, можно отнести к валентным колебаниям –СН– в метильных и метиленовых группах, а полоса при длине волны 1363 см<sup>-1</sup> соответствует СОО– асимметричным и симметричным колебаниям связей в СООН-группах, что в свою очередь может свидетельствовать о значительном количестве алифатических кислот в исследуемом образце. Интенсивная полоса поглощения при длине волны 3300 см<sup>-1</sup> соответствует колебаниям ОН-групп.

Содержание основных функциональных групп получено по данным ЯМР-спектроскопии на ядрах <sup>13</sup>C и <sup>31</sup>P. На спектре <sup>31</sup>P-ЯМР (рис. 3) наблюдаются интенсивные сигналы в диапазоне химических сдвигов δ<sub>p</sub> = 137...141 м.д. характерные для свободных фенольных гидроксидов G- и H-типа, однако вследствие сильного перекрытия сигналов не удалось провести их дифференциальную оценку (табл. 1). Содержание ОСН<sub>3</sub>-групп, полученное в результате интегрирования соответствующего сигнала на спектре <sup>13</sup>C-ЯМР, оказалось весьма низким — 3,31 % относительно массы лигнина.

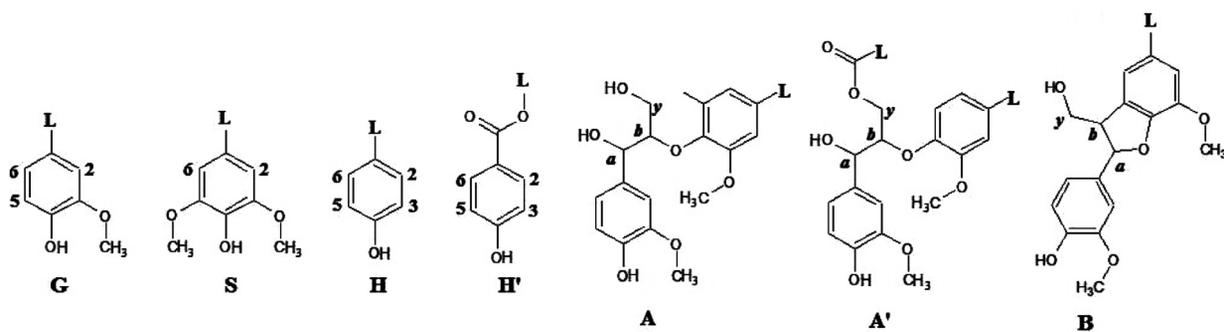
По данным элементного состава и по полученному с помощью одномерной ЯМР-спектроскопии количеству основных функциональных групп рассчитана расширенная структурная формула элементарного звена, проведено ее сравнение с эмпирическими формулами для препаратов лигнина других двудольных трав, выделенных аналогичным способом (табл. 2).

Наличие большого количества атомов водорода в формуле исследуемого лигнина свидетельствует о менее конденсированной структуре его боковых цепей. Содержание ОСН<sub>3</sub>-групп (0,19/С<sub>9</sub>) отличается от такового в лигнинах других травянистых растений и сравнительно близко к значениям лигнинов низших растений (0,01–0,45/С<sub>9</sub>) [5]. Существенное содержание фенольных ОН-групп (0,53/С<sub>9</sub>) не уникально и может свидетельствовать о высоком содержании H-единиц.

Более подробный анализ химической структуры, в частности соотношение ФПЕ, а также тип и количество основных межблочных связей в структуре исследуемого лигнина, проведен с использованием спектра HSQC эксперимента (рис. 4). Сигналы, зарегистрированные в диапазоне химических сдвигов δ<sub>C</sub>/δ<sub>H</sub> 103...135/6...8 м.д., соответствуют атомам ароматического кольца в структуре всех трех типов ФПЕ (рис. 5). Отме-



**Рис. 4.** Спектр  $[^1\text{H}-^{13}\text{C}]$  HSQC препарата лигнина камнеломки супротивнолистной: *a* — область сигналов ароматических атомов; *б* — алифатическая кислородсодержащая область спектра  
**Fig. 4.** Spectrum of  $[^1\text{H}-^{13}\text{C}]$  HSQC of Mountain saxifrage lignin: *a* — signal region of aromatic atoms; *б* — aliphatic oxygen-containing region of the spectrum



**Рис. 5.** Структурные фрагменты лигнина камнеломки супротивнолистной  
**Fig. 5.** Structural fragments of Mountain saxifrage lignin

тим интенсивный корреляционный сигнал при  $\delta_{\text{C}}/\delta_{\text{H}} = 128/7,22$  м.д., принадлежащий к структурной единице *H*-типа. Интегрирование сигналов позволило рассчитать относительное соотношение структурных единиц:  $S:G:H$  (0,21:1,01:1,00), в результате определено, что на долю *H*-единиц приходится около 45 % — значение, не характерное ни для одного образца исследуемого лигнина. Данные по другим травянистым растениям характеризуют лигнины *GSH*-типа со значительным количеством как *G*-, так и *S*-единиц. Полученный нами композиционный состав явно указывает на принадлежность исследуемого образца лигнина к гваяцил-*n*-кумаровому типу (*GH*-типу), что является его уникальной характеристикой. К достаточно близким по содержанию *H*-единиц относятся органорастворимые лигнины бобовых (на основании результатов нитробензольного окисления), для которых соотношение структурных единиц  $S:G:H$  составляет 1,03:1,00:1,04 [5].

В области  $\delta_{\text{C}}/\delta_{\text{H}} 126 \dots 130/5,0 \dots 5,5$  м.д. наблюдаются два интенсивных сигнала, отнесенные к

двойным связям в структуре ненасыщенных жирных кислот. Множество корреляционных сигналов, принадлежащих данным структурам, также наблюдается в диапазоне  $\delta_{\text{C}}/\delta_{\text{H}} 10 \dots 40/0,5 \dots 3$  м.д. (спектр не представлен). Следовательно, процедура исчерпывающей экстракцией ацетоном и очистка лигнина путем переосаждения являются неэффективными для отделения этих компонентов. Жирные кислоты — это индивидуальные компоненты клеточной стенки, оказавшиеся прочно связанными с лигнином, вероятно, через сложно-эфирную связь.

Диапазон химических сдвигов  $\delta_{\text{C}}/\delta_{\text{H}} 50-100/2,5-5,5$  м.д. (см. рис. 4, б) помимо четкого сигнала ароматических метоксильных групп дает ценную информацию о типах связей в макромолекуле лигнина и формирующих основные ди- и трехмерные фрагменты. Сигналы с химическим сдвигом  $\delta_{\text{C}}/\delta_{\text{H}} 83,6/4,30$  и  $85,8/4,11$  м.д. явно указывают на присутствие  $\beta$ -O-4 связи, формирующей фрагменты  $\beta$ -арилового эфира (структуры типа *A* и *A'* на рис. 5) между единицами *G*- и *S*-типа.

Комбинация HSQC-спектра и  $^{13}\text{C}$ -ЯМР позволила количественно оценить содержание данного типа связей, которое составляет  $\sim 7,1$  на  $100\text{C}_9$ . Слабый корреляционный сигнал, наблюдаемый при  $\delta_{\text{C}}/\delta_{\text{H}}$  86,8/5,44 м.д., указывает на присутствие связи  $\alpha$ -O-4, формирующей структуру фенолкупарона (структура типа *B* на рис. 5), в количестве 0,88 на  $100\text{C}_9$ . Следует обратить внимание на отсутствие сигнала, относящегося к фрагментам  $\beta$ -арилового эфира между единицами *H*-типа, доля которых, как уже упоминалось ранее, значительна. Вероятно, в структуре исследуемого образца содержится существенное количество фрагментов бифенила, образованного углерод-углеродной связью 5–5. Об этом также свидетельствует значительное количество свободных фенольных гидроксильных групп, определяемое ранее по результатам спектроскопии  $^{31}\text{P}$ -ЯМР. Необходимо также отметить большое количество корреляционных сигналов ( $\delta_{\text{C}}/\delta_{\text{H}}$  68...84/2,8...3,8 и 92...104/5,0...4,0 м.д.), принадлежащих атомам в структуре моносахаридов. Сигнал при  $\delta_{\text{C}}/\delta_{\text{H}}$  101/4,9 м.д. (обозначен как *F* на рис. 4, б) может свидетельствовать о присутствии фенолгликозидной связи между структурами лигнина и остатками гемицеллюлоз.

## Выводы

Выделенный препарат из стеблей камнеломки супротивнолистной (*Saxifraga oppositifolia* L.), согласно его химической структуре, наличию и количеству функциональных групп, а также данным элементного состава, имеет лигнинную природу.

Эмпирическая формула элементарного звена исследуемого препарата лигнина —  $\text{C}_9\text{H}_{11,8}\text{O}_{2,37}(\text{OCH}_3)_{0,19}(\text{OH}_{\text{ф}})_{0,53}(\text{OH}_{\text{ал}})_{0,53}(\text{OON}_{\text{COOH}})_{0,021}$  — характеризуется значительным количеством единиц *n*-гидроксифенила. Содержание  $\text{OCH}_3$ -групп образца лигнина камнеломки чрезвычайно низкое и сходно с их содержанием в лигнинах из низших растений (0,19/ $\text{C}_9$ ), в то время как содержание свободных OH-групп высокое (0,53/ $\text{C}_9$ ).

Согласно данным, полученным с помощью спектроскопии 2D-ЯМР, в химической структуре исследуемого образца лигнина присутствуют структурные единицы всех трех типов — *G*, *H* и *S*, однако преобладают гваяцильные и *n*-кумаровые — *S*:*G*:*H* = 0,21:1,01:1,00. ФПЕ *n*-кумарового типа соединены одна с другой с помощью углерод-углеродной связи, в то время как основной тип связи, характерный для структуры лигнина ( $\beta$ -O-4), наблюдается только между *G*- и *S*-единицами.

*Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП НО «Арктика» САФУ при финансовой поддержке Министерства образования и науки Архангельской обл. (номер проекта 04-2019-03а).*

*Авторы выражают благодарность проекту «Арктический плавучий университет» Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова и лично Трофимовой Анне Николаевне за отбор проб растительного материала.*

## Список литературы

- [1] Фенгель Д., Вегенер Г. Древесина (химия, ультраструктура, реакции). М: Лесная пром-сть, 1988. 512 с.
- [2] Карманов А.П., Кочева Л.С., Оводов Ю.С., Бровко О.С. Исследование лигнинов растительных отходов сельскохозяйственного производства // Теоретическая и прикладная экология, 2014. № 2. С. 35–40.
- [3] Buranov A.U., Mazza G. Lignin in straw of herbaceous crops // Industrial Crops and Products, 2008, v. 28, no. 3, pp. 237–259.
- [4] Белый В.А., Алексеев И.Н., Садыков Р.А. Изучение химической структуры лигнинов рододолы розовой (*Rhodiola Rosea* L.) и серпухи венценосной (*Serratula Coronata* L.) методом 2D ЯМР-спектроскопии // Известия Коми научного центра УрО РАН, 2012. Т. 3. № 11. С. 20–27.
- [5] Далимова Г.Н., Абдуазимов Х.А. Лигнины травянистых растений // Химия природных соединений, 1994. № 2. С. 160–177.
- [6] Пиковской И.И., Косяков Д.С., Шаврина И. С., Ульяновский Н.В. Изучение лигнина крапивы (*Urtica dioica*) методом масс-спектрометрии на основе орбитальной ионной ловушки с фотоионизацией при атмосферном давлении // Масс-спектрометрия, 2019. Т. 16. № 1. С. 49–57.
- [7] Pepper J.M., Baylis P.E.T., Adler E. The isolation and properties of lignins obtained by the acidolysis of spruce and aspen woods in dioxane-water medium // Canadian Journal of Chemistry, 1959, v. 37, no. 8, pp. 1241–1248.
- [8] Закис Г.Ф., Можейко Л.Н., Тельшева Г.М. Методы определения функциональных групп лигнина. Рига: Зинатне, 1975. 174 с.
- [9] Del Río J.C., Rencoret J., Prinsen P., Martínez A.T., Ralph J., Gutiérrez A.J. Structural Characterization of Wheat Straw Lignin as Revealed by Analytical Pyrolysis, 2D-NMR, and Reductive Cleavage Methods // J. of Agricultural and Food Chemistry, 2012, v. 60, no. 23, pp. 5922–5935.
- [10] Balakshin M., Capanema E., Gracz H., Chang H.M., Jameel H. Quantification of lignin-carbohydrate linkages with high-resolution NMR spectroscopy // Planta, 2011, v. 233, no. 6, pp. 1097–1110.
- [11] Fițișău I.F., Peter F., Boeriu C.G. Structural Analysis of Lignins from Different Sources // International J. of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering, 2013, v. 7, no. 4, pp. 167–172.
- [12] Balakshin M., Capanema E. On the Quantification of Lignin Hydroxyl Groups with  $^{31}\text{P}$  and  $^{13}\text{C}$  NMR Spectroscopy // J. of Wood Chemistry and Technology, 2015, v. 35, no. 3, pp. 220–237.
- [13] Шестаков С.Л., Косяков Д.С., Кожевников А.Ю., Ульяновский Н.В., Попова Ю.А. Совершенствование методики определения гидроксильных групп лигнина методом ЯМР-спектроскопии // Химия растительного сырья, 2017. № 2. С. 81–88.
- [14] Рохин А.В. Количественная спектроскопия ЯМР  $^1\text{H}$  и  $^{13}\text{C}$  в исследовании химической структуры лигнинов: автореф. дис. ... канд. хим. наук : 02.00.03. Иркутск, 1996. 23 с.
- [15] Zhang L., Gellerstedt G. Quantitative 2D HSQC NMR determination of polymer structures by selecting suitable internal standard references // Magnetic resonance in chemistry, 2007, no. 45, pp. 37–45.

- [16] Rabinovich M.L. Lignin by-products of Soviet hydrolysis industry: resources, characteristics, and utilization as a fuel // *Cellulose Chemistry and Technology*, 2014, no. 48 (7–8), pp. 613–631.
- [17] Gorbacheva G.A., Ivankin A.N., Sanaev V.G., Ageev A.K., Kiryukhin D.P., Kichigina G.A., Kushch P.P., Badamshina E.R. Surface Modification of Cellulose-Containing Materials with Solutions of Tetrafluoroethylene Telomers // *Russian J. Applied Chemistry*, 2017, v. 90, no. 8, pp. 1104–1110.
- [18] Тиньгаева Е.А., Фарберова Е.А. Исследование возможности использования лигнина и целлолигнина для получения гранулированных активных углей // *Вестник ПНИПУ*, 2016. № 1. С. 47–60.
- [19] Ivankin A.N., Oliferenko G.L., Kulikovskii A.V., Chernuha I.M., Semenova A.A., Spiridonov K.I., Nasonova V.V. Determination of Unsaturated Fatty Acids with a Migrating Double Bond in Complex Biological Matrices by Gas Chromatography with Flame Ionization and Mass Spectrometry Detection // *J. Analytical Chemistry*, 2016, v. 71, no. 11. pp. 1131–1137. DOI: 10.1134/S1061934816110046
- [20] Федорова О.В., Аким Э.Л. Гидролизный и сульфатный лигнин, как перспективное сырье для биотоплива // *Леса России: политика, промышленность, наука, образование: Материалы IV науч.-техн. конф. (Санкт-Петербург, 22–25 мая 2019 г.)*. Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2019. С. 325–327.

## Сведения об авторах

**Фалёва Анна Викторовна** — аспирант, «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», a.bezumova@narfu.ru

**Белесов Артем Владимирович** — аспирант, «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», a.belesov@narfu.ru

**Кожевников Александр Юрьевич** — канд. хим. наук, профессор, «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», a.kozhevnikov@narfu.ru.

Поступила в редакцию 29.10.2019.

Принята к публикации 12.02.2020.

## LIGNIN CHEMICAL STRUCTURE OF MOUNTAIN SAXIFRAGE (*SAXIFRAGA OPPOSITIFOLIA* L.) STUDY BY IR- AND NMR-SPECTROSCOPY

A.V. Faleva, A.V. Belesov, A.Yu. Kozhevnikov

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Core Facility Center «Arktika», 17, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 163002, Arkhangelsk, Russia

a.bezumova@narfu.ru

For the first time, studies have been carried out of lignin chemical structure extracted from a plant of the genus Saxifrage. Using modern physical and chemical methods, as well as elemental analysis data, information was obtained on its structure and chemical composition. According to IR spectroscopy, the lignin aromatic nature of the obtained sample was confirmed. According to the results of  $^{13}\text{C}$ - and  $^{31}\text{P}$ -NMR spectroscopy, the content of the main functional groups was calculated. A detailed empirical formula of the phenylpropane structural unit is calculated. As a result, a lignin sample was obtained, which is characterized by a low content of methoxyl groups (0,19/C<sub>9</sub>) and at the same time a significant amount of free phenolic and aliphatic hydroxyls (0,53/C<sub>9</sub>), which does not allow correlating it with any previously studied lignin. By the quantitative ratio of the main phenylpropane units, the saxifrage lignin also differs markedly from the previously studied lignins. Based on the two-dimensional nuclear magnetic resonance spectroscopy, it was found that the chemical structure of the test sample contains mainly units of the guaiacyl (*G*) and *n*-coumaric (*H*) types with a small number of syringyl (*S*) units. The data obtained indicate the belonging of the studied lignin to the *GH*-type. The ratio of *S*:*G*:*H* was 0,21:1,00:1,01.  $\beta$ -O-4 (7,1/100C<sub>9</sub>) and  $\alpha$ -O-4 (0,88/100C<sub>9</sub>) participating in the formation of the structures of  $\beta$ -aryl ether and phenylcoumarone, respectively, should be noted as the main types of bonds characteristic of the lignin structure, respectively. It is assumed that in the structure of the saxifrage, phenylpropane units of the *n*-coumar type do not participate in the formation of ether bonds, but form the lignin macromolecule due to the formation of carbon-carbon bonds and can also participate in the formation of ester bonds with fatty acid fragments.

**Keywords:** herbaceous plants, lignin, chemical structure, spectroscopy

**Suggested citation:** Faleva A.V., Belesov A.V., Kozhevnikov A.Yu. *Izuchenie khimicheskoy struktury lignina kamnelomki suprotivolistnoy (Saxifraga oppositifolia L.) metodami IR- i YaMR-spektroskopii* [Lignin chemical structure of Mountain saxifrage (*Saxifraga oppositifolia* L.) study by IR and NMR-spectroscopy]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 2, pp. 111–118. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-111-118

## References

- [1] Fengel D., Vegener G. *Drevesina (khimiya, ul'trastruktura, reaktivnosti)* [Wood (chemistry, ultrastructure, reactions)]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forestry], 1988, 512 p.
- [2] Karmanov A.P., Kocheva L.S., Ovodov Yu.S., Brovko O.S. *Issledovanie ligninov rastitel'nykh otkhodov sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva* [Research of lignins of plant wastes of agricultural production]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* [Theoretical and applied ecology], 2014, no. 2, pp. 35–40.

- [3] Buranov A.U., Mazza G. Lignin in straw of herbaceous crops. *Industrial Crops and Products*, 2008, v. 28, no. 3, pp. 237–259.
- [4] Belyy V.A., Alekseev I.N., Sadykov R.A. *Izuchenie khimicheskoy struktury ligninov rodioly rozovoy (Rhodiola Rosea L.) i serpukhi ventsenosnoy (Serratula Coronata L.) metodom 2D YaMR-spektroskopii* [Study of the chemical structure of lignins of *Rhodiola rosea* (*Rhodiola Rosea* L.) and *serratula coronata* (*Serratula Coronata* L.) by 2D NMR spectroscopy]. *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra UrO RAN* [Proceedings of the Komi science center Ural branch of the RAS], 2012, v. 3, no. 11, pp. 20–27.
- [5] Dalimova G.N., Abduazimov Kh.A. *Ligniny travyanistykh rasteniy [Lignins of herbaceous plants]. Khimiya prirodnikh soedineniy* [Chemistry of natural compounds], 1994, no. 2, pp. 160–177.
- [6] Pikovskoy I.I., Kosyakov D.S., Shavrina I. S., Ul'yanovskiy N.V. *Izuchenie lignina krapivy (Urtica dioica) metodom mass-spektrometrii na osnove orbital'noy ionnoy lovushki s fotoionizatsiyey pri atmosfernom davlenii* [Study of the nettle (*Urtica dioica*) lignin by orbitrap mass spectrometry with atmospheric pressure photoionization]. *Mass-spektrometriya* [Mass-spectrometry], 2019, v. 16, no. 1, pp. 49–57.
- [7] Pepper J.M., Baylis P.E.T., Adler E. The isolation and properties of lignins obtained by the acidolysis of spruce and aspen woods in dioxane-water medium. *Canadian Journal of Chemistry*, 1959, v. 37, no. 8, pp. 1241–1248.
- [8] Zakis G.F., Mozheyko L.N., Telysheva G.M. *Metody opredeleniya funktsional'nykh grupp lignina* [Methods for determining lignin functional groups]. Riga: Zinatne, 1975, 174 p.
- [9] Del Río J.C., Rencoret J., Prinsen P., Martínez A.T., Ralph J., Gutiérrez A.J. Structural Characterization of Wheat Straw Lignin as Revealed by Analytical Pyrolysis, 2D-NMR, and Reductive Cleavage Methods. *J. of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, v. 60, no. 23, pp. 5922–5935.
- [10] Balakshin M., Capanema E., Gracz H., Chang H.M., Jameel H. Quantification of lignin-carbohydrate linkages with high-resolution NMR spectroscopy. *Planta*, 2011, v. 233, no. 6, pp. 1097–1110.
- [11] Fişigău I.F., Peter F., Boeriu C.G. Structural Analysis of Lignins from Different Sources. *International J. of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*, 2013, v. 7, no. 4, pp. 167–172.
- [12] Balakshin M., Capanema E. On the Quantification of Lignin Hydroxyl Groups with  $^{31}\text{P}$  and  $^{13}\text{C}$  NMR Spectroscopy. *J. of Wood Chemistry and Technology*, 2015, v. 35, no. 3, pp. 220–237.
- [13] Shestakov S.L., Kosyakov D.S., Kozhevnikov A.Yu., Ul'yanovskiy N.V., Popova Yu.A. *Sovershenstvovanie metodiki opredeleniya gidroksil'nykh grupp lignina metodom YaMR-spektroskopii* [The elaboration of NMR analysis of different types of hydroxyl groups in the lignin samples]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw materials], 2017, no. 2, pp. 81–88.
- [14] Rokhin A.V. *Kolichestvennaya spektroskopiya YaMR  $^1\text{H}$  i  $^{13}\text{C}$  v issledovanii khimicheskoy struktury ligninov* [Quantitative  $^1\text{H}$  and  $^{13}\text{C}$  NMR spectroscopy in the study of the chemical structure of lignins]. Diss. Sci. (Chemical): 02.00.03. Irkutsk, 1996, 23 p.
- [15] Zhang L., Gellerstedt G. Quantitative 2D HSQC NMR determination of polymer structures by selecting suitable internal standard references. *Magnetic resonance in chemistry*, 2007, no. 45, pp. 37–45.
- [16] Rabinovich M.L. Lignin by-products of Soviet hydrolysis industry: resources, characteristics, and utilization as a fuel // *Cellulose Chemistry and Technology*, 2014, no. 48 (7–8), pp. 613–631.
- [17] Gorbacheva G.A., Ivankin A.N., Sanaev V.G., Ageev A.K., Kiryukhin D.P., Kichigina G.A., Kushch P.P., Badamshina E.R. Surface Modification of Cellulose-Containing Materials with Solutions of Tetrafluoroethylene Telomers // *Russian J. Applied Chemistry*, 2017, v. 90, no. 8, pp. 1104–1110.
- [18] Tin'gaeva E.A., Farberova E.A. *Issledovanie vozmozhnosti ispol'zovaniya lignina i tselloolignina dlya polucheniya granulirovannykh aktivnykh ugley* [The study of the possibility of using lignin and cellolignin to obtain granular activated carbons]. *Vestnik PNIPU* [Bulletin of PNIPU], 2016, no. 1, pp. 47–60.
- [19] Ivankin A.N., Oliferenko G.L., Kulikovskii A.V., Chernuha I.M., Semenova A.A., Spiridonov K.I., Nasonova V.V. Determination of Unsaturated Fatty Acids with a Migrating Double Bond in Complex Biological Matrices by Gas Chromatography with Flame Ionization and Mass Spectrometry Detection // *J. Analytical Chemistry*, 2016, v. 71, no. 11, pp. 1131–1137. DOI: 10.1134/S1061934816110046

## Authors' information

**Falyeva Anna Viktorovna** — Postgraduate student of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, a.bezumova@narfu.ru

**Belesov Artyem Vladimirovich** — postgraduate student of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, a.belesov@narfu.ru

**Kozhevnikov Aleksandr Yurievich** — Cand. Sci. (Chemistry), Professor of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, a.kozhevnikov@narfu.ru;

Received 29.10.2019.

Accepted for publication 12.02.2020.

## ПРИМЕНЕНИЕ НАНОФИБРИЛЛЯРНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ В КОМПОЗИЦИИ БУМАГИ ДЛЯ ГОФРИРОВАНИЯ

Л.И. Семкина<sup>1</sup>, Н.В. Сарана<sup>1</sup>, Е.В. Лепешкина<sup>1</sup>, Е.М. Товстошуров<sup>1</sup>,  
Н.Л. Горячев<sup>1</sup>, Е.Т. Тюрин<sup>1</sup>, А.А. Зуйков<sup>1</sup>, С.А. Константинова<sup>2</sup>,  
А.А. Новиков<sup>2</sup>, Б.М. Аникушин<sup>2</sup>, В.А. Винокуров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Центральный научно-исследовательский институт бумаги», 141260, Московская обл., Пушкинский р-н, пос. Правдинский, ул. Ленина, д. 15/1

<sup>2</sup>ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (Национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина», 119991, Москва, Ленинский пр-т., д. 65

cniiib@mail.ru

Приведены результаты исследований водных дисперсий природных высокомолекулярных соединений растительного происхождения, в частности древесной нанофибриллярной целлюлозы, полученной путем поэтапной деполимеризации целлюлозы с использованием кислотного гидролиза и механической обработки. Изучено влияние полученных образцов нанофибриллярной целлюлозы на основные показатели механической прочности бумаги для гофрирования (промежуточного слоя гофрокартона) при введении их в бумажную массу в количестве 0,5 %; 1; 3; 5; 12; 20 %. Показано, что введение нанофибриллярной целлюлозы в композицию бумаги из 100 % макулатуры для гофрирования повышает все показатели механической прочности, причем наибольший их рост наблюдался при введении нанофибриллярной целлюлозы в количестве до 12 %.

**Ключевые слова:** наноцеллюлоза, нанофибриллярная целлюлоза, микроскопическое исследование, макулатура, бумага для гофрирования, гофрокартон, механические показатели бумаги

**Ссылка для цитирования:** Семкина Л.И., Сарана Н.В., Лепешкина Е.В., Товстошуров Е.М., Горячев Н.Л., Тюрин Е.Т., Зуйков А.А., Константинова С.А., Новиков А.А., Аникушин Б.М., Винокуров В.А. Применение нанофибриллярной целлюлозы в композиции бумаги для гофрирования // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 2. С. 119–126. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-119-126

В последние годы в мире значительно вырос интерес к использованию наноматериалов. Нанотехнологии и наноматериалы применяются уже во многих отраслях, в частности в промышленности, обороне, энергетике, биотехнологиях, медицине. Судя по росту мировых инвестиций в развитие нанотехнологий, использование наноматериалов в ближайшем будущем станет одним из определяющих факторов экономического развития.

В зарубежных странах имеется опыт производства и применения наноцеллюлозы (НЦ) в авиастроении, электронике, производстве строительных материалов и других отраслях, в том числе и в целлюлозно-бумажной. Производимая в Канаде, Германии и других странах НЦ марки ARBOCEL NANO MF 40 была разработана в целях применения в целлюлозно-бумажной промышленности для облагораживания и мелования бумаги и картона [1]. Ее свойства приведены в соответствии с имеющимися технологическими требованиями. При этом лабораторные, пилотные и производственные эксперименты показали, что НЦ можно применять как самостоятельную добавку для улучшения механических показателей бумаги, а также для полной или частичной замены водорастворимых связующих (крахмала, НаКМЦ или поливинилового спирта), в результате чего наряду с качественным улучшением

бумажной продукции может быть достигнута экономия затрат на ее производство.

Наноцеллюлоза является очень перспективным наноматериалом ввиду наличия доступной и возобновляемой сырьевой базы. Сырьем для ее производства служит практически любой целлюлозосодержащий материал — древесина, хлопок, конопля, лен и другие продукты растениеводства, а также отходы переработки сельскохозяйственной продукции, например сахарной свеклы [2–4]. Поскольку в России имеется значительное количество лесных ресурсов, целесообразно вести работы в данном направлении.

За рубежом в последние десятилетия широко проводятся исследования по получению НЦ и ее использованию при производстве бумаги, однако в основном в лабораторных условиях.

В результате изучения влияния НЦ на физико-механические показатели бумаги [5–12] было установлено, что ее использование в качестве добавки в бумагу и картон в зависимости от композиции, массы 1 м<sup>2</sup> и количества добавленной НЦ приводит к следующим изменениям показателей качества бумаги:

- умеренному повышению прочности на разрыв в сухом состоянии на 9...20 % (больше для целлюлозы, чем для древесной массы);
- снижению воздухопроницаемости на 20...30 %;

- уменьшению непрозрачности на 2...3 %;
- увеличению плотности на 3...17 %;
- повышенному гигрорасширению до 30 %.

В связи с тем что НЦ не адсорбируется на целлюлозном волокне, для повышения ее удержания в работе [11] было предложено использовать катионные добавки, в частности полиамидаминэпихлоргидриновую смолу (ПАЕ). Масса сначала обрабатывается ПАЕ, а затем в нее вводится НЦ в количестве 60...100 мг/г. При этом индекс разрыва при растяжении увеличивается от 2 до 2,5 раза в сухом состоянии и более чем в 3 раза во влажном.

При введении НЦ в бумажную массу в работах [7–10] отмечается ухудшение обезвоживания массы при отливе и уменьшение содержания сухих веществ после влажного прессования. Время обезвоживания массы увеличивается от 60 до 100 %, а содержание сухих веществ после прессования снижается от 0,5 до 4 %.

В настоящее время еще недостаточно изучено удержание НЦ при отливе бумаги и картона [13–18]. Основная причина заключается в том, что НЦ трудно обнаружить в бумаге, так как она химически подобна целлюлозе, а после сушки фибриллы нельзя увидеть под микроскопом.

В Российской Федерации отсутствует промышленное производство НЦ и в процессах получения бумаги и картона она не применяется, однако разработки проводятся.

## Цель работы

Целью работы является изучение влияния нанопибриллярной целлюлозы (НФЦ) на свойства бумаги для гофрирования, которая применяется при производстве гофрокартона в качестве промежуточного слоя.

## Материалы и методы

При проведении исследований использовались два образца нанопибриллярной целлюлозы, изготовленные в ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина» путем поэтапной деполимеризации целлюлозы с применением кислотного гидролиза и механической обработки. Образец НФЦ № 1 был изготовлен из целлюлозы белой сульфатной листовенной производства АО «Архангельский ЦБК», образец НФЦ № 2 — из небеленой сульфитной хвойной целлюлозы производства АО «Соликамскбумпром» (табл. 1). По своему функциональному (химическому) составу полученные образцы полностью идентичны функциональному составу микрокристаллической целлюлозы (установлено методом ИК-Фурье спектроскопии).

В ОАО «ЦНИИБ» проанализировано распределение частиц по длине волокон представленных

Т а б л и ц а 1

### Характеристика экспериментальных образцов нанопибриллярной целлюлозы Characteristic of experimental nanofibrillated cellulose samples

Наименование показателя	НФЦ № 1	НФЦ № 2
Физическое состояние	Гидрогель без посторонних включений	
Содержание твердого вещества, %	9,0 ~ 11,0	2,0
Вязкость ( $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , концентрация 2,0 %), мПа	Не менее 6500	–
Цвет	Белый	
Вкус	Безвкусный	
Запах	Без запаха	
pH	Нейтральный (6,5–7,0)	
Светопропускание	При прохождении видимого цвета через гель наблюдается явление опалесценции (эффект Тиндаля)	

Т а б л и ц а 2

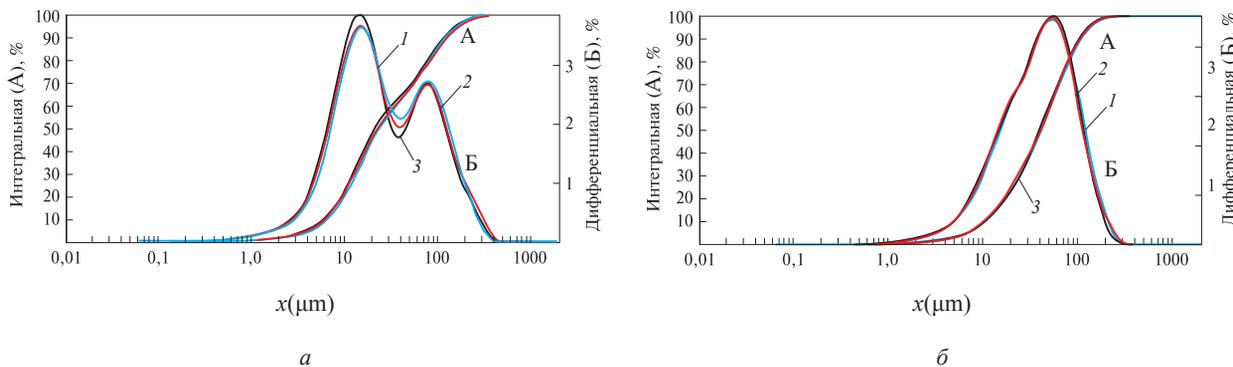
### Распределение волокон нанопибриллярной целлюлозы по длине, % (объемный) Fiber length distribution of NFC

Длина волокна НФЦ, мкм	НФЦ № 1	НФЦ № 2
1	0,6	0,2
1,1	0,7	0,3
1,2	0,8	0,3
1,3	1,0	0,4
10	21,0	9,7
11	24,1	11,2
25	52,5	32,5
100	85,1	88,6
315	99,6	100,0
500	100,0	100,0

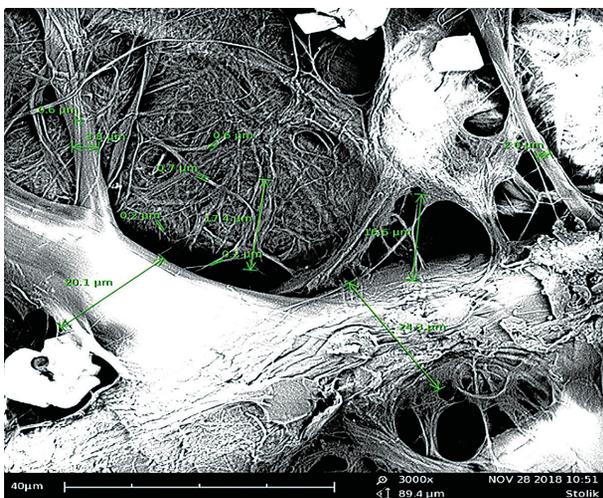
образцов НФЦ с применением лазерного дифракционного анализатора ANALYSETTE 22 Micro-Tecplus фирмы FRITZSCH (Германия). Диапазон измерения размера частиц на данном приборе — от 0,08 до 2000,00 мкм (рис. 1, табл. 2).

Полученная кривая (см. рис. 1, а) распределения длин волокон образца НФЦ № 1 имеет два максимума: 15...16 мкм и 70...80 мкм. Кривая распределения длин волокон образца НФЦ № 2 (см. рис. 1, б) существенно отличается по виду от кривой распределения длин волокон образца НФЦ № 1: на ней имеется один максимум 50...60 мкм.

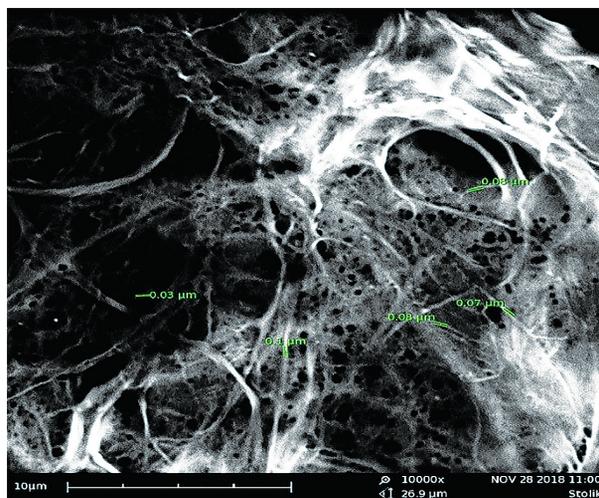
В табл. 2 представлена объемная доля фракций волокон по длине для каждого образца НФЦ по трем параллельным пробам.



**Рис. 1.** Кривая распределения длин волокон образца: *a* — НФЦ № 1; *б* — НФЦ № 2; 1–3 — результаты измерений параллельных проб  
**Fig.1.** Fiber length distribution curve: *a* — NFC No. 1; *б* — NFC No. 2; 1–3 — results of measurements of parallel samples



*a*



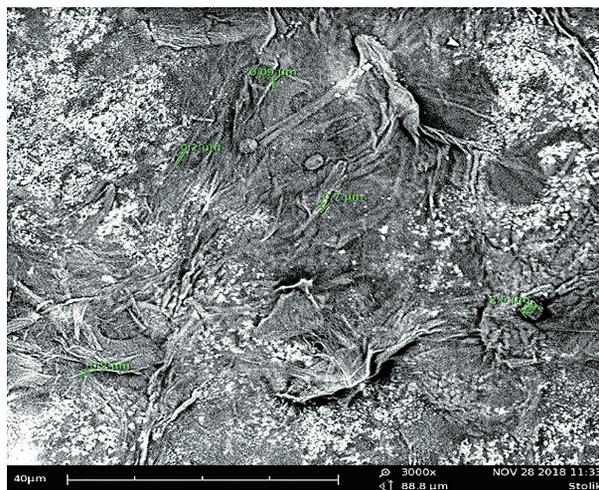
*б*

**Рис. 2.** Фото высушенной на воздухе пленки гидрогеля образца НФЦ № 1; увеличение: *a* — 3000 x; *б* — 10000 x  
**Fig. 2.** Photo of air-dried NFC hydrogel film from sample No. 1; increase: *a* — 3000 x; *б* — 10000 x

Из полученных данных видно, в образце НФЦ № 1 больше коротких волокон, но имеются и длинные волокна, т. е. кривая распределения длин волокон образца НФЦ № 1 имеет более размытый характер. Максимумы на кривой распределения образца НФЦ № 1 15...16 и 70...80 мкм не совпадают с максимумом образца НФЦ № 2 50...60 мкм, который находится в области, близкой к минимальной точке перегиба кривой образца НФЦ № 1 — 40 мкм.

Проведены микроскопические исследования высушенных образцов НФЦ с использованием микроскопа Phenom 2 (рис. 2, 3).

На микрофотографиях образцов НФЦ видно, что только часть волокон имеет наноразмерную ширину (менее 0,1 мкм), в то время как основная масса волокон имеет большую ширину, равную нескольким десяткам мкм. По визуальной оценке, в образце НФЦ № 1 наноразмерных волокон больше, чем в образце НФЦ № 2.



**Рис. 3.** Фото высушенной на воздухе пленки гидрогеля образца НФЦ № 2; увеличение 5000 x  
**Fig. 3.** Photo of air-dried NFC hydrogel film from sample No. 2; increase 5000 x

Т а б л и ц а 3

**Результаты испытаний лабораторных образцов бумаги для гофрирования  
с различным содержанием НФЦ (образец № 1)**

The results of testing laboratory corrugating paper samples with different NFC content (sample No. 1)

Показатель	Опыт 1					Опыт 2		
	0	0,5	1,0	3,0	5,0	0	12	20
Расход НФЦ, %	0	0,5	1,0	3,0	5,0	0	12	20
Абсолютное сопротивление продавливанию кПа	351	349	350	368	379	383	484	495
Удельное сопротивление разрыву, кН/м	6,3	6,3	6,3	6,8	7,1	6,7	8,7	9,0
Сопротивление плоскостному сжатию, Н	207	205	207	214	218	227	266	273
Сопротивление торцовому сжатию, кН/м	1,58	1,57	1,59	1,78	1,82	1,81	2,20	2,37
Прочность на излом, число двойных перегибов	199	–	346	–	571	313	671	687

Т а б л и ц а 4

**Результаты испытаний лабораторных образцов бумаги для гофрирования  
с различным содержанием НФЦ (образец № 2)**

The results of testing laboratory corrugating paper samples with different NFC content (sample No. 2)

Показатель	Опыт 1					Опыт 2		
	0	0,5	1,0	3,0	5,0	0	12	20
Расход НФЦ, %	0	0,5	1,0	3,0	5,0	0	12	20
Абсолютное сопротивление продавливанию кПа	330	335	336	347	350	373	400	414
Удельное сопротивление разрыву, кН/м	5,7	5,9	6,1	6,2	6,3	6,9	7,8	7,9
Сопротивление плоскостному сжатию, Н	184	187	192	203	206	193	223	221
Сопротивление торцовому сжатию, кН/м	1,49	1,51	1,54	1,63	1,70	1,82	2,08	2,05
Прочность на излом, число двойных перегибов	176	–	201	–	240	366	362	283

Т а б л и ц а 5

**Относительное изменение показателей качества бумаги для гофрирования  
с различным содержанием НФЦ**

Relative change of corrugating paper quality with different NFC content

Показатель	Расход НФЦ, %					
	5		12		20	
	НФЦ № 1	НФЦ № 2	НФЦ № 1	НФЦ № 2	НФЦ № 1	НФЦ № 2
Удельное сопротивление разрыву	12,7	10,3	28,0	13,0	35,0	14,5
Абсолютное сопротивление продавливанию	8,0	6,1	26,2	7,2	29,2	11,0
Сопротивление торцовому сжатию	15,2	14,1	23,4	14,3	30,0	12,7
Сопротивление плоскостному сжатию	5,3	12,0	17,1	15,5	20,3	14,5
Прочность на излом	186,9	36,4	114,3	–1,1	119,5	–22,7

Исследования образцов НФЦ, проведенные в ОАО «ЦНИИБ», показали, что два переданных на испытания образца существенно различаются между собой.

Влияние добавок НФЦ изучено применительно к их использованию в технологии производства бумаги для гофрирования (промежуточного слоя гофрокартона) путем изготовления лабораторных образцов при массе 1 м<sup>2</sup>, равной 125 ± 5 г, на листоотливном аппарате Рапид-Кеттен по следующим технологическим параметрам:

Состав по волокну:  
макулатура марки МС-5Б, % ..... 100  
Степень помола макулатурной  
массы, °ШР ..... 34–38

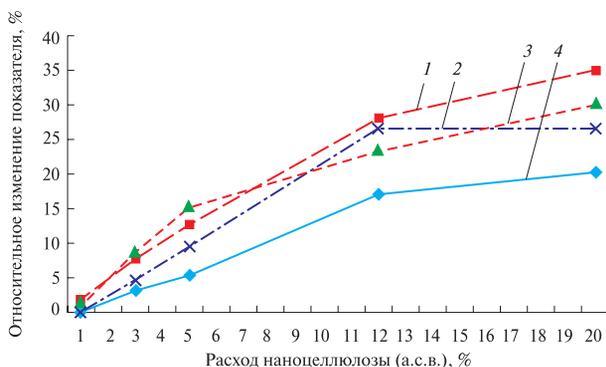
Расход химикатов (а.с.в), %:

катионный крахмал  
марки Empresol N ..... 0,6  
клей на основе димеров алкилкетенов  
марки Флоусайз ..... 0,2  
нанофибриллярная целлюлоза ... от 0 до 20,0

### Результаты и обсуждение

Влияние добавок образцов НФЦ к макулатурной массе в количестве от 0 (контрольный вариант) до 20,0 % на показатели качества лабораторных образцов бумаги для гофрирования приведено в табл. 3 и 4.

Принимая во внимание то, что образцы НФЦ передавались для испытания в разное время, при-



**Рис. 4.** Относительное изменение показателей качества бумаги для гофрирования от расхода НФЦ № 1: 1 — удельное сопротивление разрыву; 2 — абсолютное сопротивление продавливанию; 3 — сопротивление торцовому сжатию; 4 — сопротивление плоскостному сжатию

**Fig. 4.** The relative change in the quality indicators of paper for corrugation from the consumption of the NFC No. 1: 1 — specific tensile strength; 2 — absolute bursting resistance; 3 — resistance to mechanical compression; 4 — resistance to plane compression

ходилось каждый раз готовить новую партию макулатурной массы и, соответственно, новый контрольный вариант бумаги для сравнения. В этих условиях правильнее сравнивать относительные изменения значений показателей качества бумаги, а не абсолютные их величины (рис. 4, 5, табл. 5) [19–26].

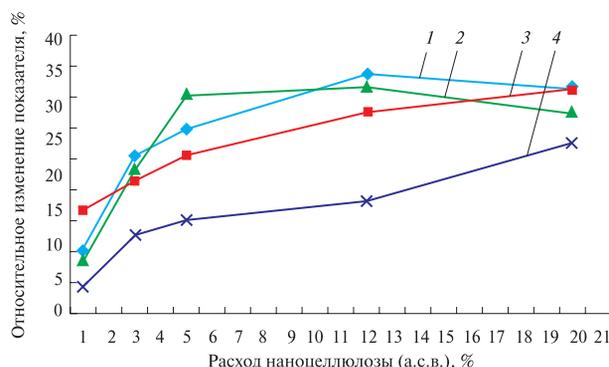
Из представленного табличного и графического материала видно, что при введении НФЦ в бумажную массу все показатели бумаги улучшаются. При этом больший эффект достигается при использовании образца НФЦ № 1.

Замечено различное влияние образцов НФЦ № 1 и НФЦ № 2 на показатель прочности на излом. При введении образца НФЦ № 1 наблюдался значительный прирост показателя (более 100 %), добавка образца НФЦ № 2 в бумажную массу при расходе 5 % приводила к повышению показателя на 38,4 %, а при расходе 12 % сопровождалась его снижением, что, возможно, объясняется меньшим содержанием в образце НФЦ № 2 наноразмерных волокон целлюлозы. Присутствие же в бумажной массе большого количества целлюлозной мелочи обычно отрицательно отражается на показателе прочности на излом.

### Выводы

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно отметить следующее:

- согласно микрофотографическому анализу образцов НФЦ наряду с отдельными нанофибриллами, имеющими наноразмерную ширину менее 0,1 мкм, содержит крупные фрагменты микрофибрилл шириной до нескольких десятков мкм;
- по визуальной оценке, в образце НФЦ № 1 наноразмерных волокон содержится больше, чем в образце НФЦ № 2;



**Рис. 5.** Относительное изменение показателей качества бумаги для гофрирования от расхода НФЦ № 2: 1 — удельное сопротивление разрыву; 2 — абсолютное сопротивление продавливанию; 3 — сопротивление торцовому сжатию; 4 — сопротивление плоскостному сжатию

**Fig. 5.** The relative change in the quality indicators of paper for corrugation from the consumption of the NFC No. 2: 1 — specific tensile strength; 2 — absolute bursting resistance; 3 — resistance to mechanical compression; 4 — resistance to plane compression

– введение в размолотую бумажную массу исследуемых образцов НФЦ способствовало повышению всех механических показателей качества бумаги для гофрирования;

– эффективность применения образцов НФЦ, полученной из разного сырья, различна. Лучший прирост значений показателей качества бумаги был получен в основном при использовании НФЦ, изготовленной из белой сульфатной лиственной целлюлозы, т. е. из образца НФЦ № 1.

Особо заметное различное влияние оказало введение образцов НФЦ на показатель прочности на излом — образец НФЦ № 1 вызвал прирост показателя более чем на 100 %, а образец НФЦ № 2 — при расходах 12 % и более привел даже к снижению этого показателя.

Наибольший рост значений показателей качества наблюдался при введении НФЦ в композицию бумаги для гофрирования до 12 %, при дальнейшем увеличении расхода НФЦ до 20 % рост показателей качества замедлялся (образец НФЦ № 1) или показатели качества бумаги даже ухудшались (образец НФЦ № 2).

Применение НФЦ при производстве упаковочных материалов позволяет повысить показатели механической прочности, что обеспечит возможность создания более прочных материалов с использованием дешевых видов сырья.

### Список литературы

[1] Schlosser H. Nano Disperse Cellulose und Nano Fibrillierte Cellulose – neue Produkte für die Herstellung und Veredelung von Papier und Karton // Wochenblatt für Papierfabrikation, 2008, no. 6, pp. 252–263.  
 [2] Наноцеллюлоза: рынок и перспективы. URL: <https://www.agroxxi.ru/anonsy/nanocelluloza-rynok-i-perspektivy.html> (дата обращения 10.10.2019).

- [3] Прошина О.П., Олиференко Г.Л., Евдокимов Ю.М., Иванкин А.Н., Наноцеллюлоза и получение бумаги на ее основе // Тез. докл. Междунар. конф. «Нанотехнологии и наноматериалы в лесном комплексе». Москва, 15–17 ноября, 2011. М.: МГУЛ, 2011. С. 24–28.
- [4] Инновационный портал Белгородской области. URL: <http://innovation.derbo.ru/ik/efko> (дата обращения 10.10.2019).
- [5] Eriksen O., Syverud K., Gregersen O. The Use of Microfibrillated Cellulose Produced from Kraft Pulp as Strength Enhancer in TMP Paper // Nordic Pulp and Paper Research J., 2008, no. 23 (3), pp. 299–304.
- [6] Taipale T., Osterberg M., Nykanen A., Ruokolainen J., Laine J. Effect of Microfibrillated Cellulose and Fines on the Drainage of Kraft Pulp Suspension and Paper Strength // Cellulose, 2010, no. 17(5), pp. 1005–1020.
- [7] Manninen M., Kajanto I., Happonen J., Paltakari J. The Effect of Microfibrillated Cellulose Addition on Drying Shrinkage and Dimensional Stability of Wood-Free Paper // Nordic Pulp and Paper Research Journal, 2011, no. 26(3), pp. 297–305.
- [8] Hejnsson-Hultén A., Basta J., Samuelsson M., Greschik T., Ander P., Daniel G. The Influence of Microfibrillated Cellulose (MFC) on Paper Strength and Surface Properties // Bioresources, 2012, no. 7(3), pp. 3051–3063.
- [9] Henschen J., Li D., Ek M. Preparation of cellulose nanomaterials via cellulose oxalates // Carbohydrate Polymers, 2019, v. 213, no. 6, pp. 208–216.
- [10] Hii C., Gregersen Ø.W., Chinga-Carrasco G., Eriksen The Effect of MFC on the Pressability and Paper Properties of TMP- and GCC-Based Sheets // Nordic Pulp and Paper Research J., 2012, no. 27(2), pp. 388–396.
- [11] Kajanto I., Kosonen M. Potential use of micro- and nano-fibrillated cellulose as a reinforcing element in paper // J. of Science & Technology for Forest Products and Processes, 2012, v. 2, no. 6, pp. 42–48.
- [12] Ahola S. Properties and interfacial Behaviour of Cellulose Nanofibrils. Doctor Thesis // TKK Reports in Forest products Technology, ser. A4. Helsinki: Helsinki University of Technology, 2008, 82 p.
- [13] Петров В.А., Гибадуллин М.Р., Аверьянова Н.В., Мезиков В.К. Получение наноцеллюлозы и физико-механические характеристики пленок на ее основе // Вестник Казанского технологического университета, 2011. № 14. С. 181–185.
- [14] Yu Z., Rao G., Yan X., Huo P., Wang Ch., Savitskaya T., Hrynshpan. D. Preparation and properties of pea starch – poly lysine composite films // Science and Technology of Food Industry Journal, 2018, v. 39, no 13, pp. 89–94.
- [15] Ranby B.G. Fibrous macromolecular systems. Cellulose and muscle. The colloidal properties of cellulose micelles // Discuss. Faraday Soc., 1951, v. 11, pp. 158–164.
- [16] Grinshpan D.D., Gonchar A.N., Savitskaya T.A., Tsyganokova N.G., Makarevich S.E. Rheological properties of cellulose-chitosan-phosphoric acid systems in different phase states // Polymer Science A, 2014, v. 56, no. 2, pp. 137–145.
- [17] Lavoine N., Desloges I., Dufresne A., Bras J. Microfibrillated cellulose – its barrier properties and applications in cellulosic materials: a review // Carbohydrate Polymers. 2012, v. 90, no. 3, pp. 735–764.
- [18] Рыжонков Д.И., Левина В.В., Дзидзигури Э.Л. Наноматериалы. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. 365 с.
- [19] Bondeson D., Mathew A., Oksman K. Optimization of the isolation of nanocrystals from microcrystalline cellulose by acid hydrolysis // Cellulose, 2006, v. 13, no. 4, pp. 171–180.
- [20] Moon R.J., Martini A., Naim J., Simonsen J., Youngblood J. Cellulose nanomaterials review: structure, properties and nanocomposites // Chemical Society Reviews, 2011, v. 40, pp. 3941–3994.
- [21] Флягэ Д.М. Технология бумаги. М.: Лесн. пром-ть, 1988. 440 с.
- [22] Liu L., Kerr W.L., Kong F., Dee D.R., Lin M. Influence of nano-fibrillated cellulose (NFC) on starch digestion and glucose absorption // Carbohydrate Polymers, 2018, v. 196, no. 9, pp. 146–153.
- [23] Espinosa S.C., Kuhnt T., Foster E.J., Weder C. Isolation of thermally stable cellulose nanocrystals by phosphoric acid hydrolysis // Biomacromolecules, 2013, v. 14, no 4, pp. 1223–1230.
- [24] Revol J.F., Bradford H., Giasson J., Marchessault R.H., Gray D.G. Helicoidal self-ordering of cellulose microfibrils in aqueous suspension // International Journal of Biological Macromolecules, 1992, v. 14, no. 3, pp. 170–172.
- [25] Cherian J., Paulose J., Vysakh P. Harnessing nature's hidden material: Nano-Cellulose // Materials Today; Proceedings, 2018, v. 5, no. 5, part 2, pp. 12609–12614.
- [26] Araki J., Wada M., Kuga S., Okano T. Flow properties of microcrystalline cellulose suspension prepared by acid treatment of native cellulose // Colloids and Surf. A, 1998, v. 142, no. 1, pp. 75–82.

## Сведения об авторах

**Семкина Людмила Ивановна** — зав. лабораторией бумаги ОАО «Центральный научно-исследовательский институт бумаги», [sniiib@mail.ru](mailto:sniiib@mail.ru)

**Сарана Нинель Васильевна** — канд. хим. наук, вед. науч. сотр. ОАО «Центральный научно-исследовательский институт бумаги», [sniiib@mail.ru](mailto:sniiib@mail.ru)

**Лепешкина Елена Владимировна** — науч. сотр. ОАО «Центральный научно-исследовательский институт бумаги», [sniiib@mail.ru](mailto:sniiib@mail.ru)

**Товстошуров Евгений Михайлович** — ст. науч. сотр. ОАО «Центральный научно-исследовательский институт бумаги», [sniiib@mail.ru](mailto:sniiib@mail.ru)

**Горячев Никита Леонидович** — канд. хим. наук, руководитель испытательного центра целлюлозно-бумажной продукции «ЦКАЛ» ОАО «Центральный научно-исследовательский институт бумаги», [sniiib@mail.ru](mailto:sniiib@mail.ru)

**Тюрин Евгений Тимофеевич** — канд. экон. наук, генеральный директор ОАО «Центральный научно-исследовательский институт бумаги», [sniiib@mail.ru](mailto:sniiib@mail.ru)

**Зуйков Александр Александрович** — канд. техн. наук, первый зам. ген. директора по науч. работе ОАО «Центральный научно-исследовательский институт бумаги», [sniiib@mail.ru](mailto:sniiib@mail.ru)

**Константинова Светлана Алексеевна** — канд. биол. наук, науч. сотр. ФГАОУ ВО «РГУ Нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина», [novikov.a@gubkin.ru](mailto:novikov.a@gubkin.ru)

**Новиков Андрей Александрович** — канд. хим. наук, ст. науч. сотр. ФГАОУ ВО «РГУ Нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина», [novikov.a@gubkin.ru](mailto:novikov.a@gubkin.ru)

Поступила в редакцию 14.10.2019.

Принята к публикации 19.12.2019.

## NANOFIBRILLATED CELLULOSE IN CORRUGATING PAPER COMPOSITION

L.I. Semkina<sup>1</sup>, N.V. Sarana<sup>1</sup>, E.V. Lepeshkina<sup>1</sup>, E.M. Tovstoshkurov<sup>1</sup>, N.L. Goraychev<sup>1</sup>, E.T. Tyurin<sup>1</sup>, A.A. Zuikov<sup>1</sup>, S.A. Konstantinova<sup>2</sup>, A.A. Novikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Open stock company (OSC) «Central Paper Re-search Institute», 15/1, Lenina st., 141260, set. Pravdinski, Pushkinski district, Moscow reg., Russia

<sup>2</sup>Federal state autonomous higher educational institution «Russian University of Oil and Gas» (National Research University), «Gubkin University», 6, Leninski prospect, 119991, Moscow, Russia

cnib@mail.ru

This article presents the results of research of aqueous dispersions of natural high molecular compounds of plant origin wood nanofibrillated cellulose, obtained by cellulose gradual depolymerization using acid hydrolysis and mechanical treatment. The effect of the obtained nanofibrillated cellulose samples on the mechanical strength of corrugating paper (intermediate layer of corrugated board) was also examined while adding them in 0,5 %; 1; 3; 5; 12; 20 % concentrations. The results of the experiments show that the addition of nanofibrillated cellulose in the composition of corrugating paper from 100 % waste paper leads to the increase of all indicators of mechanical strength. The greatest increase in the values of quality was observed at the addition of nanofibrillated cellulose in the composition of corrugating paper in the amount till 12 %.

**Keywords:** nanocellulose, nanofibrillated cellulose, microexamination, waste paper, corrugating paper, corrugated board, mechanical indicators of paper

**Suggested citation:** Semkina L.I., Sarana N.V., Lepeshkina E.V., Tovstoshkurov E.M., Goraychev N.L., Tyurin E.T., Zuikov A.A., Konstantinova S.A., Novikov A.A. *Primenenie nanofibrillyarnoy tsellyulozy v kompozitsii bumagi dlya gofirovaniya* [Nanofibrillated cellulose in the composition of corrugating paper]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 2, pp. 119–126. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-119-126

### References

- [1] Schlosser H. Nano Disperse Cellulose und Nano Fibrillierte Cellulose – neue Produkte für die Herstellung und Veredelung von Papier und Karton. *Wochenblatt für Papierfabrikation*, 2008, no. 6, pp. 252–263.
- [2] *Nanotsellyuloza: rynok i perspektivy* [Nanocellulose: market and prospects]. URL: <https://www.agroxxi.ru/anonsy/nanocellyuloza-rynok-i-perspektivy.html> (accessed 10.10.2019).
- [3] Proshina O.P., Oliferenko G.L., Evdokimov Yu.M., Ivankin AN. *Nanotsellyuloza i poluchenie bumagi na ee osnove* [Nanocellulose and the preparation of paper based on it] *Tez. dokl. Mezhdunar. konf. «Nanotekhnologii i nanomaterialy v lesnom komplekse»* [Proc. report International conf. «Nanotechnologies and nanomaterials in the forest complex»]. Moscow, 15–17 November 2011. Moscow: MGUL, 2011, pp. 24–28.
- [4] *Innovatsionnyy portal Belgorodskoy oblasti* [Innovation portal of the Belgorod region]. URL: <http://innovation.derbo.ru/ik/efko> (accessed 10.10.2019).
- [5] Eriksen O., Syverud K., Gregersen O. The Use of Microfibrillated Cellulose Produced from Kraft Pulp as Strength Enhancer in TMP Paper // *Nordic Pulp and Paper Research J.*, 2008, no. 23 (3), pp. 299–304.
- [6] Taipale T., Osterberg M., Nykanen A., Ruokolainen J., Laine J. Effect of Microfibrillated Cellulose and Fines on the Drainage of Kraft Pulp Suspension and Paper Strength. *Cellulose*, 2010, no. 17(5), pp. 1005–1020.
- [7] Manninen M., Kajanto I., Happonen J., Paltakari J. The Effect of Microfibrillated Cellulose Addition on Drying Shrinkage and Dimensional Stability of Wood-Free Paper. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 2011, no. 26(3), pp. 297–305.
- [8] Hejnsson-Hultén A., Basta J., Samuelsson M., Greschik T., Ander P., Daniel G. The Influence of Microfibrillated Cellulose (MFC) on Paper Strength and Surface Properties. *Bioresources*, 2012, no. 7(3), pp. 3051–3063.
- [9] Henschen J., Li D., Ek M. Preparation of cellulose nanomaterials via cellulose oxalates. *Carbohydrate Polymers*, 2019, v. 213, no. 6, pp. 208–216.
- [10] Hii C., Gregersen Ø.W., Chinga-Carrasco G., Eriksen The Effect of MFC on the Pressability and Paper Properties of TMP- and GCC-Based Sheets. *Nordic Pulp and Paper Research J.*, 2012, no. 27(2), pp. 388–396.
- [11] Kajanto I., Kosonen M. Potential use of micro- and nanofibrillated cellulose as a reinforcing element in paper. *J. of Science & Technology for Forest Products and Processes*, 2012, v. 2, no. 6, pp. 42–48.
- [12] Ahola S. Properties and interfacial Behaviour of Cellulose Nanofibrils. Doctor Thesis. TKK Reports in Forest products Technology, ser. A4. Helsinki: Helsinki University of Technology, 2008, 82 p.
- [13] Petrov V.A., Gibadullin M.R., Averyanova N.V., Mezikov V.K. *Poluchenie nanotsellyulozy i fiziko-mekhanicheskie kharakteristiki plenok na ee osnove* [Preparation of nano cellulose and physicomechanical characteristics of films based on it] *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Kazan Technological University], 2011, no. 14, pp. 181–185.
- [14] Yu Z., Rao G., Yan X., Huo P., Wang Ch., Savitskaya T., Hrynshpan. D. Preparation and properties of pea starch – poly lysine composite films. *Science and Technology of Food Industry Journal*, 2018, v. 39, no 13, pp. 89–94.
- [15] Ranby B.G. Fibrous macromolecular systems. Cellulose and muscle. The colloidal properties of cellulose micelles. *Discuss. Faraday Soc.*, 1951, v. 11, pp. 158–164.
- [16] Grinshpan D.D., Gonchar A.N., Savitskaya T.A., Tsygankova N.G., Makarevich S.E. Rheological properties of cellulose-chitosan-phosphoric acid systems in different phase states. *Polymer Science A*, 2014, v. 56, no. 2, pp. 137–145.
- [17] Lavoine N., Desloges I., Dufresne A., Bras J. Microfibrillated cellulose – its barrier properties and applications in cellulosic materials: a review. *Carbohydrate Polymers*. 2012, v. 90, no. 3, pp. 735–764.
- [18] Ryzhonkov D.I., Levina V.V., Dzidziguri E.L. *Nanomaterialy* [Nanomaterials]. Moscow: BINOM. Laboratory of Knowledge, 2008, 365 p.

- [19] Bondeson D., Mathew A., Oksman K. Optimization of the isolation of nanocrystals from microcrystalline cellulose by acid hydrolysis. *Cellulose*, 2006, v. 13, no. 4, pp. 171–180.
- [20] Moon R.J., Martini A., Nairn J., Simonsen J., Youngblood J. Cellulose nanomaterials review: structure, properties and nanocomposites. *Chemical Society Reviews*, 2011, v. 40, pp. 3941–3994.
- [21] Flate D.M. *Tekhnologiya bumagi* [Paper technology]. Moscow: Lesn. prom-t' [Forest Industry], 1988, 440 p.
- [22] Liu L., Kerr W.L., Kong F., Dee D.R., Lin M. Influence of nano-fibrillated cellulose (NFC) on starch digestion and glucose absorption. *Carbohydrate Polymers*, 2018, v. 196, no. 9, pp. 146–153.
- [23] Espinosa S.C., Kuhnt T., Foster E.J., Weder C. Isolation of thermally stable cellulose nanocrystals by phosphoric acid hydrolysis. *Biomacromolecules*, 2013, v. 14, no 4, pp. 1223–1230.
- [24] Revol J.F., Bradford H., Giasson J., Marchessault R.H., Gray D.G. Helicoidal self-ordering of cellulose microfibrils in aqueous suspension. *International Journal of Biological Macromolecules*, 1992, v. 14, no. 3, pp. 170–172.
- [25] Cherian J., Paulose J., Vysakh P. Harnessing nature's hidden material: Nano-Cellulose. *Materials Today; Proceedings*, 2018, v. 5, no. 5, part 2, pp. 12609–12614.
- [26] Araki J., Wada M., Kuga S., Okano T. Flow properties of microcrystalline cellulose suspension prepared by acid treatment of native cellulose. *Colloids and Surf. A*, 1998, v. 142, no. 1, pp. 75–82.

## Authors' information

**Semkina Lyudmila Ivanovna** — Paper Laboratory in OSC Central Paper Research Institute, [cniib@mail.ru](mailto:cniib@mail.ru)

**Sarana Ninel' Vasil'evna** — Cand. Sci. (Chemic.), Chief Scientific Worker in OSC Central Paper Research Institute, [cniib@mail.ru](mailto:cniib@mail.ru)

**Lepeshkina Elena Vladimirovna** — Scientific Worker in OSC Central Paper Research Institute, [cniib@mail.ru](mailto:cniib@mail.ru)

**Tovstoshkurov Evgeniy Mikhaylovich** — Head Scientific Worker in OSC Central Paper Research Institute, [cniib@mail.ru](mailto:cniib@mail.ru)

**Goryachev Nikita Leonidovich** — Cand. Sci. (Chemic.), Test Center of pulp and paper products in OSC Central Paper Research Institute, [cniib@mail.ru](mailto:cniib@mail.ru)

**Tyurin Evgeniy Timofeevich** — Cand. Sci. (Economic), General Director of OSC Central Paper Research Institute, [cniib@mail.ru](mailto:cniib@mail.ru)

**Zuykov Aleksandr Aleksandrovich** — Cand. Sci. (Tech.), the First Deputy Director of science in OSC Central Paper Research Institute, [cniib@mail.ru](mailto:cniib@mail.ru)

**Konstantinova Svetlana Alekseevna** — Cand. Sci. (Biological), Scientific Worker in the University of Oil and Gas, [novikov.a@gubkin.ru](mailto:novikov.a@gubkin.ru)

**Novikov Andrey Aleksandrovich** — Cand. Sci. (Chemic.), Head Scientific Worker in the University of Oil and Gas, [novikov.a@gubkin.ru](mailto:novikov.a@gubkin.ru)

Received 14.10.2019.

Accepted for publication 19.12.2019.