

ЛЕСНОЙ ВЕСТНИК / FORESTRY BULLETIN

Научно-информационный журнал

№ 1 ' 2021 Том 25

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

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

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, ректор ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, Воронеж

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

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

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

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

Кириухин 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

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

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

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

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

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

Наквасина Елена Николаевна, д-р с.-х. наук, профессор, Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, Высшая школа естественных наук и технологий, Архангельск

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Щепашенко 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. Рязской

Учредитель МГТУ им. Н.Э. Баумана

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

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-68118 от 21.12.2016

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

Материалы настоящего журнала могут быть перепечатаны и 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 18.01.2021.

Тираж 600 экз.

Заказ №

Объем 18,25 п. л.

Цена свободная

LESNOY VESTNIK / FORESTRY BULLETIN

Scientific Information journal
№ 1 ' 2021 Vol. 25

Editor-in-chief

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

Editorial council of the journal

Artamonov Dmitriy Vladimirovich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Penza State
Ashraf Darwish, Associate Professor of Computer Science, Faculty of Computer Science, Helwan University, Cairo, Egypt, Machine Intelligence Research Labs (MIR Labs), USA
Belyaev Mikhail Yur'evich, Dr. Sci. (Tech.), Head of Department, Deputy Director of S.P. Korolev RSC «Energia», Moscow
Bemman Al'brekht, Professor, the Dresden technical university, professorate Institute for countries of Eastern Europe, Germany
Besschetnov Vladimir Petrovich, Professor, Dr. Sci. (Biol.), Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, Nizhny Novgorod
Burmistrova Olga Nikolaevna, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Ukhta State Technical University, Ukhta
Chubinskiy Anatoliy Nikolaevich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Saint Petersburg State Forest Technical University, St. Petersburg
Chumachenko Sergey Ivanovich, Professor, Dr. Sci. (Biol.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow
Deglise Xavier, Dr. Sci. (Agric.), Academician of the IAWS, Academician of the French Academy of Agriculture, Nancy, France
Drapalyuk Mikhail Valentinovich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Rector of VSUFT, Voronezh
Evdokimov Yuriy Mikhaylovich, Professor, Ph. D. (Chemical); academician of the New York Academy of Sciences, corr. Academy of Natural Sciences, a member of the Central Board of Nanotechnology Society of Russia, Moscow
Zalesov Sergey Veniaminovich, Professor, 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 policy specialization, George-August-Universitet, 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
Makuev Valentin Anatol'evich, Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor, BMSTU (Mytishchi branch), Moscow
Malashin Alexey Anatolyevich, Professor, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow
Martynuk Aleksandr Aleksandrovich, Dr. Sci. (Agric.), VNIILM, Moscow
Melekhov Vladimir Ivanovich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, NARFU, Arkhangelsk
Moiseyev Aleksandr Nikolaevich, Senior Researcher, European Forest Institute, Joensuu, Finland
Nakvasina Elena Nikolaevna, Professor, Dr. Sci. (Agric.), Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Higher School of Natural Sciences and Technology, Arkhangelsk
Niemz Peter, Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c., Prof. for Wood Physics, ETH Zurich (Swiss Federal Institute of Technology in Zurich; Eidgenossische Technische Hochschule Zurich)
Oblivin Aleksandr Nikolaevich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Academician of the Russian Academy of Natural Sciences and MANVSH, Honored worker of science and equipment of the Russian Federation, BMSTU, Moscow
Pasztor, 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
Shchepashchenko Dmitry Gennadievich, Associate Professor, Dr. Sci. (Biol.), Senior Researcher, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Austria
Shimkovich Dmitriy Grigor'evich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), OOO «Kudesnik», Moscow
Strekalov Aleksandr Fedorovich, Ph. D. (Tech.), JSC «Tactical Missiles Corporation», Korolev
Teodoronskiy Vladimir Sergeevich, Professor, Dr. Sci. (Agric.), academician of the Russian Academy of Natural Sciences, BMSTU (Mytishchi branch), Moscow
Titov Anatoliy Matveevich, Ph. D. (Tech.), Deputy Chief of Department, Scientific Secretary of the Board of MCC TSNIIAMASH, 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 18.01.2021.
Circulation 600 copies
Order №
Volume 18,25 p. p.
Price free

СОДЕРЖАНИЕ

БИОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА

Глушко С.Г., Галиуллин И.Р., Прохоренко Н.Б. Реализация стратегии лесообразователей в ходе восстановительных сукцессий	5
Ведерников К.Е., Загребин Е.А., Бухарина И.Л., Кузьмин П.А. Биохимические особенности древесины ели сибирской (<i>Picea obovata</i> Ledeb.) как отражение жизненного состояния растений	13
Бессчетнов В.П., Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов П.В. Наследственная обусловленность видоспецифичности тополей по содержанию крахмала в тканях побегов	22
Махнева С.Г., Менщиков С.Л. Качество пыльцы сосны обыкновенной (<i>Pinus sylvestris</i> L.) в зоне действия выбросов АО «Карабашмедь»	32
Смирнов А.И., Орлов Ф.С., Аксенов П.А., Никитин В.Ф. Использование низкочастотного электромагнитного поля и гидрогеля для увеличения приживаемости и роста сеянцев ели европейской (<i>Picea abies</i> L.)	45

ЛАНДШАФТНАЯ АРХИТЕКТУРА

Бочкова И.Ю., Хохлачева Ю.А. Исследование почвопокровных растений в целях их использования на объектах ландшафтной архитектуры	53
Фролова А.В., Леонова В.А. Императорская аллея и Быкова роща в музее-усадьбе «Архангельское»: история создания, реставрации и приспособления к современным условиям	64
Кирева Т.В. Конструкция и устройство зеленых крыш Ф. Хундертвассера	72

БИОТЕХНОЛОГИЯ И ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

Кононов Г.Н., Веревкин А.Н., Сердюкова Ю.В., Зайцев В.Д. Миколиз древесины, его продукты и их использование. III. Физиология и биохимия миколиза древесины	81
Иванкин А.Н., Зарубина А.Н., Кулезнев А.С., Зенкин А.Н., Куликовский А.В. Определение минорных компонентов биотоплива, изготовленного на основе таллового масла, влияющих на экологическую безопасность при сгорании	89
Галкин В.П., Горяев А.А., Баланцева Н.Б., Калиничева О.А., Калинина А.А., Сиротов А.В., Тарлаков Я.В., Усачев М.С. Гибридное энергообеспечение жилых поселений в РФ	100
Евдокимов Ю.М., Герасимова И.Н., Грушева Т.Г., Степанов А.Г. О Д.И. Менделееве и его Периодической системе. Продолжение	109

ЛЕСОИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО

Платонов А.А. Современное состояние технических средств механизации для удаления нежелательной растительности	115
Карпачев С.П., Быковский М.А., Лаптев А.В. Методика выбора манипулятора харвестера	123

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Комаров Е.Г., Лозовецкий В.В., Лебедев В.В., Черкина В.М. Моделирование системы автономной теплофикации при трансформации тепловой энергии, образующейся в серверных станциях	130
Клехо Д.Ю., Карелина Е.Б., Батырев Ю.П. Использование технологии сверточных нейронных сетей в сегментации объектов изображения	140

CONTENTS

BIOLOGICAL AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF FORESTRY

Glushko S.G., Galiullin I.R., Prokhorenko N.B. Implementation of tree species strategy during progressive successions	5
Vedernikov K.E., Zagrebin E.A., Bukharina I.L., Kuzmin P.A. <i>Picea obovata</i> Ledeb. wood biochemical characteristics as state of plants	13
Besschetnov V.P., Besschetnova N.N., Besschetnov P.V. Genetic dependence of poplar species specificity on starch content in shoots tissues	22
Makhniova S.G., Menshchikov S.L. Common pine (<i>Pinus sylvestris</i> L.) pollen quality in JSC «Karabashmed» emission zone	32
Smirnov A.I., Orlov F.S., Aksenov P.A., Nikitin V.F. Low-frequency electromagnetic field and hydrogel to increase survival rate and growth of European spruce (<i>Picea abies</i> L.) seedlings	45

LANDSCAPE ARCHITECTURE

Bochkova I.Yu., Khokhlacheva Yu.A. Ground cover plants research for objects of landscape architecture	53
Frolova A.V., Leonova V.A. The Imperial alley and Bykov grove in museum-estate «Arkhangelskoye»: the history of creation, restoration and adaptation to modern conditions	64
Kireeva T.V. Construction and design of F. Hundertwasser green roofs	72

BIOTECHNOLOGY AND CHEMICAL PROCESSING OF WOOD

Kononov G.N., Verevkin A.N., Serdyukova Yu.V., Zaitsev V.D. Wood mycolysis, it's products and their use. III. Physiology and biochemistry of wood mycolysis	81
Ivankin A.N., Zarubina A.N., Kuleznev A.S., Zenkin A.N., Kulikovskii A.V. Minor components determination of tall oil-based biofuels that affect environment during combustion	89
Galkin V.P., Goriaev A.A., Balantseva N.B., Kalinicheva O.A., Kalinina A.A., Sirotov A.V., Tarlakov Y.V., Usachev M.S. Hybrid power supply of residential settlements in Russian Federation	100
Evdokimov Yu.M., Gerasimova I.N., Grusheva T.G. Stepanov A.G. D.I. Mendeleev and Periodic system. Continued	109

FOREST ENGINEERING

Platonov A.A. Modern state of technical means to remove uncontrolled vegetation	115
Karpachev S.P., Bykovskiy M.A., Laptev A.V. Method of selecting a harvester manipulator	123

MATH MODELING

Komarov E.G., Lozovetsky V.V., Lebedev V.V., Cherkina V.M. Autonomous heating system during transformation of thermal energy formed in server stations	130
Klekho D.Yu., Karelina E.B., Batyrev Yu.P. Development of intelligent process control system for image segmentation	140

РЕАЛИЗАЦИЯ СТРАТЕГИИ ЛЕСООБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ХОДЕ ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ СУКЦЕССИЙ

С.Г. Глушко¹, И.Р. Галиуллин¹, Н.Б. Прохоренко²

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

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

glushkosg@mail.ru

На примере восстановительных смен в лесах рассмотрены особенности проявления лесоводственных свойств основными лесообразующими породами, произрастающими в дубравных условиях Среднего Поволжья. Сделан вывод о преобладании в районе исследований пионерно-серийных лесных сообществ, сформированных пионерными видами. Виды-пионеры, по своим лесоводственным свойствам существенно различающиеся от так называемых «пород коренного леса», повсеместно распространяются в современных лесах. Показано, что на поздних этапах лесовосстановительных сукцессий большое значение имеют пионерно-серийные лесные сообщества, производительность которых приобретает устойчивость. Выявлен незавершенный характер восстановительных смен в обследованных лесах. Для восстановления коренных лесов требуется выполнение комплекса дополнительных мероприятий, способствующих реконструкции лесов и всего лесного фонда региона. Влияние массового разрушения лесов на процессы формирования лесорастительных условий определено в качестве актуальной проблемы для дальнейшего изучения. Установлена взаимосвязь изменения поведения основных лесных видов и лесных сообществ с изменением лесорастительных условий. Указано что вырубка лесов массово разрушает биотическую среду и изменяет средообразовательные процессы, вызывая соответствующие проявления лесоводственных свойств у лесных растений и их сообществ. Проявления лесоводственных свойств носят адаптивный характер, в данной связи рубка лесов, с массовым разрушением биотической среды и соответствующим изменением средообразовательных процессов, способствует проявлению свойств присущих пионерно-серийным лесным сообществам. С деградацией коренных лесов констатируется смена поведения основных лесных видов и лесных сообществ составляющих современные леса. Многие лесоводственные свойства, присущие коренным лесам, в современных условиях не проявляются. Вместо коренных лесов распространяются леса вторичные, производные, с иными лесоводственными свойствами и их проявлениями в виде комплексной характеристики поведения или жизненной стратегии. Проявляемые лесными сообществами и отдельными видами свойства нуждаются в обобщении, для проведения дальнейших исследований. Предложено объединить все свойства лесов в понятие информационного потенциала, которое можно использовать для исследования особенностей проявления лесоводственных свойств в условиях меняющейся природной среды.

Ключевые слова: лесные сукцессии, информация, свойства лесов, индикация условий

Ссылка для цитирования: Глушко С.Г., Галиуллин И.Р., Прохоренко Н.Б. Реализация стратегии лесообразователей в ходе восстановительных сукцессий // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 1. С. 5–12. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-5-12

Повсеместная смена типично-коренных лесов на производные стала причиной широкого распространения лесовосстановительных сукцессий, которые отличаются от обычных для коренных лесов возрастных смен и требуют исследования. Успешное лесовосстановление следует признавать нормальным, а соответствующие восстановительные сукцессии можно считать типовыми. Для кедровников Дальнего Востока такие нормальные или типовые сукцессии описаны в работах Т.А. Комаровой [1, 2]. В большинстве «освоенных» регионов, к которым относится Среднее Поволжье, лесовосстановительные сукцессии отличаются от нормальных — типовых. Современные восстановительные сукцессии, господствующие на обширных территориях, часто незавершенного характера, на поздних этапах которых наблюдаются не коренные или условно-коренные, а формируются устойчиво-производные лесные сообщества. Лесообразующие

породы в составе производных и коренных лесов часто различаются по проявляемым свойствам. В статье представлена информация об особенностях лесоводственных свойств отдельных видов и сообществ, формирующих дубравы и производные от них леса. Рассмотрено понятие о информационном потенциале вида как совокупности всех его свойств, обобщение которых позволит упорядочить исследования закономерностей проявления этих свойств. Дальнейшее исследование лесоводственных свойств растений будет способствовать оценке современного состояния лесов и происходящих в них лесообразовательных процессов.

Цель работы

Выявление особенностей лесоводственных свойств, проявляемых основными лесообразующими породами в ходе лесовосстановительных сукцессий в дубравах и производных от них лесах.

Материалы и методы

Исследование жизненной стратегии растений, по особенностям выявляемых приспособлений и признаков, совмещается с информацией о закономерностях проявления разнообразных, в том числе скрытых, лесоводственных свойств лесообразующих пород [1–5]. Адаптивно обусловленное проявление лесоводственных свойств в целом соответствует стратегии жизни или комплексной характеристике поведения, а изменения лесоводственных свойств, наблюдаемые в производных лесах, составляют основу современных лесообразовательных процессов.

Объектом исследований послужили восстановительные смены в дубравах и производных от них лесах нескольких регионов России расположенных преимущественно в Среднем Поволжье, а также на Дальнем Востоке [6, 7]. На примере лесных смен рассмотрены проявления лесоводственных свойств лесообразующих пород. Предложено обобщать все свойства лесных растений и их сообществ в понятии информационного потенциала. В работе использованы известные методы полевых лесоводственно-геоботанических исследований В.Н. Сукачева [8], в том числе информация о закономерностях фитосоциального поведения растений и их сообществ [5].

Пробные площади закладывались с учетом отраслевых стандартных требований (ОСТ 56–69–83. Площади пробные...). Обобщение собранных сведений выполнено на основе работ Л.Г. Раменского [4], Т.А. Работнова [3], В.Н. Сукачева [5, 8], В.Б. Сочавы [9], Б.П. Колесникова [10], Т.А. Комаровой [1, 2] и других исследователей [11–13].

Результаты и обсуждение

В 2019 г. в окрестностях г. Казани, на территории Пригородного лесничества в урочище «Дубравное», нами были заложены пробные площади. По пробным площадям описаны фрагменты — этапы (стадии) восстановительного процесса, обычного для дубравных условий Татарстана и иных регионов Среднего Поволжья, а также Южного Урала. Таксационные характеристики древостоев приведены ниже, в табл. 1, 2.

В функционировании сложных систем высока вероятность случайных изменений. Случайные воздействия определяют высокий уровень разнообразия раннесукцессионных лесных сообществ [14]. Пионерные леса в дубравных условиях представлены разнообразными осиновыми, березовыми, липовыми сообществами. Богатство дубравных условий предопределяет смешанный состав и сложную структуру формирующихся здесь пионерных древостоев. В условиях района закладки пробных площадей (урочище

Дубравное) дубняки массово сменились березняками. В составе образовавшихся вторичных (производных) древостоев преобладает береза повислая (*Betula pendula* Roth.), заметно участие осины (*Populus tremula* L.) и накопление разновозрастных поколений липы сердцевидной (*Tilia cordata* Mill.). На пробных площадях № 1-2019 и № 2-2019 (см. табл. 1), описаны средние этапы лесовосстановительной сукцессии, когда пионерный древостой березы постепенно сменяется разновозрастным устойчивым липняком.

На пробных площадях № 3-2019 и № 4-2019 (см. табл. 2) охарактеризованы поздне-сукцессионные устойчиво-производные липняки, возникшие на месте деградированных дубрав. Дуб черешчатый (*Quercus robur* L.) полностью отсутствует в подросте и его восстановление в обозримой перспективе не прослеживается. Подобные липняки вполне обычны для Среднего Поволжья, Южного Урала, а также для отдельных регионов Российского Дальнего Востока.

Дуб монгольский (*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb.) на Дальнем Востоке, проявляя качества «эксплерента» на ранних этапах своего онтогенеза оказался способен к захвату обширных территорий. В дальнейшем за счет быстрого превращения в «абиотического пациента» низкоствольный дуб закрепляется на склонах дальневосточных сопков, образуя дериваты кедрово-дубовых лесов и обширную зону широколиственных (дубово-липовых) лесов.

Дуб черешчатый в Среднем Поволжье оказался менее пластичен, и хотя доля низкоствольных дубрав в твердолиственном хозяйстве достигает 30 %, дуб уступает свои позиции идущей ему на смену липе. Южная полоса зоны хвойно-широколиственных лесов [11] в Среднем Поволжье постепенно разлагается на составляющие, в которых хвойные и широколиственные компоненты существуют раздельно, а формируемая зона вторичных — производных широколиственных лесов представлена преимущественно липняками [6, 7].

Участие лесообразующих пород на разных этапах сукцессионного развития (см. табл. 1, 2) связано с особенностями их фитосоциального поведения, фитоценоотипом или типом стратегии жизни. Береза и тем более осина, являясь пионерными породами, не образуют повторных (подпологовых) поколений и постепенно выпадают из состава лесных сообществ, причем осина как типичный пионер раньше березы. Береза участвует в составе серийных сообществ, идущих на смену пионерным и даже присутствует на поздних этапах лесных сукцессий, проявляя качества серийной породы, переходной от пионеров — эксплерентов к виолентам. Липа выступает как порода «коренного леса», накапливая

Т а б л и ц а 1

Таксационная характеристика березовых древостоев

Characteristics of birch stands

Породный состав	Возраст, лет	Класс бонитета	Количество деревьев, шт.	Средний диаметр, см	Средняя высота, м	Полнота абсолютная, м ² /га	Полнота относительная	Запас стволовой древесины, м ³ /га	
								растущей	сухостоя
Древостой на пробной площади № 1-2019									
6 Б	80	II	155	32,3	25,0	12,700	0,3884	145,20	10,48
2 Лп	70		61	28,6	21,0	3,900	0,1104	37,40	0,55
1 Лп	50		142	16,0	15,0	2,860	0,1048	21,80	1,48
1Д	130		12	52,0	24,0	2,550	0,0737	27,48	–
+ Ос	70		10	36,8	26,0	1,100	0,0272	10,10	4,00
Итого			380			23,110	0,7045	241,98	16,51
Древостой на пробной площади № 2-2019									
5 Б	90	II	89	36,3	25,0	9,180	0,2710	109,25	24,00
2 Лп	70		75	28,6	22,0	4,850	0,1239	48,50	1,00
2 Лп	50		203	16,0	16,0	4,087	0,1068	31,54	1,12
1 Д	140		8	56,8	24,0	2,120	0,0510	26,30	2,00
+ Кл	50		70	16,8	14,0	1,550	0,0660	10,08	–
Итого			445			21,787	0,6187	225,67	28,12

Т а б л и ц а 2

Таксационная характеристика липовых древостоев

Characteristics of linden stands

Породный состав	Возраст, лет	Класс бонитета	Количество деревьев, шт.	Средний диаметр, см	Средняя высота, м	Полнота абсолютная, м ² /га	Полнота относительная	Запас стволовой древесины, м ³ /га	
								растущей	сухостоя
Древостой на пробной площади № 3-2019									
4 Лп	80	II	91	32,3	23,0	7,460	0,2011	78,00	2,00
2 Лп	60		219	18,6	17,0	5,980	0,1990	47,80	1,00
3 Б	90		64	36,0	25,0	6,540	0,2000	72,60	18,00
1 Кл	50		93	16,8	15,0	2,072	0,0900	14,08	–
Д	150		5	56,8	24,0	1,200	0,0347	13,00	3,50
Итого			472			23,525	0,7248	225,48	24,50
Древостой на пробной площади № 4-2019									
6 Лп	90	II	133	36,3	24,0	13,790	0,3591	140,0	3,00
2 Лп	60		226	18,7	18,0	6,240	0,2100	52,40	1,00
1 Б	90		30	36,0	25,0	3,100	0,0981	33,80	19,00
1 Кл	60		132	16,9	16,0	2,970	0,1368	21,92	–
Д	160		4	60,8	24,0	1,100	0,0380	12,00	4,50
Итого			525			27,200	0,8420	260,12	27,50

под пологом пионерного древостоя несколько поколений, заметно участвуя в подросте и постепенно формируя устойчивый липняк. Твердолиственные (дуб, клен) остаются в качестве пород — ассектаторов.

В целом пробные площади представляют разные этапы восстановительной сукцессии. Анализ проявляемых всеми лесообразующими породами свойств позволяет констатировать формирование устойчиво-производных липняков. Лесовосстановительный процесс на обследованных участках носит незавершенный характер, восста-

новление господствующих позиций дуба не просматривается. В обследованных нами регионах отмечаются подобные процессы утраты господствующих позиций коренными породами (кедр, ель). Например, в северных районах Республики Татарстан очередное массовое усыхание ельников (2010–2013) вызвало практически повсеместную ликвидацию условий, до недавнего времени обеспечивающих совместное произрастание хвойных и широколиственных пород, следствием чего стало заметное распространение вторичных (производных) липовых лесов [6, 7].

Распространенный в пионерно-серийных или производных лесах тип стратегии лесовосстановителей можно рассматривать как адаптивную реакцию лесной биоты на изменение природной среды. Изменение стратегии жизни, проявление лесовосстановителями необычных свойств может означать как «эволюцию приспособлений» так и существенное изменение среды обитания. Последнее мы считаем наиболее вероятным. Под жизненной стратегией обычно понимают комплексную характеристику поведения вида в конкретных условиях [1, 3, 4]. Стратегия — это адаптивное поведение с наблюдаемым проявлением свойств в реально складывающихся условиях местообитания [1].

В соответствии с учением о типах жизненных стратегий [1, 3, 4] дуб черешчатый (и дуб монгольский) следует отнести к видам-виолентам. Лесоводственные свойства, проявляемые дубом в условиях Среднего Поволжья разнообразны и кроме типичной виолентности заметны проявления пациентности и даже эксплерентности [6]. Свойства эксплерента и пациента, проявляемые таким типичным виолентом, как дуб черешчатый (и дуб монгольский), вызывают научный интерес и заслуживают внимания [15–17].

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

Материалами лесостроительства отмечается низкоствольность значительной части насаждений дуба в Среднем Поволжье (до 30 %), таксирована низкая сохранность и неудовлетворительное состояние многих культур дуба, товарность дубрав явно завышена. Массовое появление порослевых и близких к ним (по проявляемым свойствам) низкоствольных дубрав — это своеобразная реакция на формирующиеся условия местообитания, провоцирующие эксплерентное (пионерное) поведение растений и их сообществ.

На региональном уровне заметны существенные изменения в лесном фонде Среднего Поволжья. Например, в хвойном хозяйстве Татарстана господство перешло к лесам искусственного происхождения (до 80 %), отмечено массовое усыхание ельников (2010–2013 г). В твердолиственном

хозяйстве характерно разрастание низкоствольных дубрав (около 35 %), увеличивается доля малоценного клена (до 10 %). В мягколиственных лесах выявляются многочисленные факты снижения качества древесины (особенно в липняках), отмечаются резкие распады древостоев в осинниках и березняках. Проявление свойств эксплерентов (эксплерентное поведение) наблюдается повсеместно у всех лесовосстановителей, ускоренный рост сочетается с быстрым созреванием и относительно ранней гибелью, часто принимающей вид «массового усыхания».

Ускоренный рост и затяжная вегетация растений обуславливают плохую подготовленность слабо одревесневших тканей к зиме и сильное повреждение деревьев морозами, в частности массовое «вымерзание» дубрав в Республике Татарстан, гибель лесных культур кедр сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour) в Приморском крае. Быстрый рост (особенно в культурах), плохая адаптированность к биоусловиям интенсивно формирующегося лесного сообщества (в возрасте 20...30 лет) наряду со слабой способностью к пациентному поведению часто становятся причиной существенного ослабления и гибели культур сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.).

Эксплерентность, способность к пионерному поведению проявляют практически все лесные растения и их сообщества в той мере, в какой это соответствует их информационному потенциалу (проявленным и скрытым лесоводственным свойствам). Доминирование одной лесовосстановительной породы на разных этапах лесных сукцессий с существенным изменением стратегии характерно для относительно упрощенных сообществ северной тайги (лиственничники) и в дериватах дубовых лесов.

Леса Среднего Поволжья дают богатый материал, демонстрируя многочисленные (комплексные) проявления лесоводственных свойств в ходе реализации различающейся стратегии жизни. Например, лесоводственные свойства дуба черешчатого задействованы в целях адаптации к складывающимся условиям и могут быть указаны в ряду первоочередных объектов лесоводственных исследований.

Лесоводственные свойства — это вся совокупность свойств, присущих лесному виду (лесовосстановительной породе) в его стратегии жизни и проявляемых во времени (онтогенез, сукцессии) и в пространстве (ареал). Информационный потенциал объединяет все свойства различных частей биоты — как проявленные в жизненной стратегии, так и непроявленные (скрытые). Непроявленные или редко проявляемые свойства исследуются при тщательном рассмотрении приспособлений, признаков, а также основных

закономерностей проявления свойств рассматриваемого вида.

Информационные потенциалы у разных видов различаются величиной (емкостью), соотношением скрытых и проявляемых свойств, соответствием условиям местообитания — природной среде. Эксплерентное поведение, проявление пионерных свойств в ходе реализации жизненной стратегии отражают высокую степень соответствия, адаптации вида к условиям природной среды, формируемым преимущественно абиотическими средообразующими факторами (абиосредой). Условиям природной среды, преобразуемым биотическими факторами (биосредой), в большей степени соответствует поведение виолентное и отчасти пациентное (биотические пациенты).

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

Снижение лесистости на территории Татарстана с 54 % в 1800 г. до 17 % к настоящему времени (2020 г.) позволяет констатировать массовое сведение лесов, разрушение лесной биоты и формирование условий, образно говоря «глобальной вырубке». Адаптация растений к изменяющейся среде составляет предмет внимания лесной науки [18]. В формирующихся условиях практически все лесообразователи, адаптируясь к абиотической среде, проявляют эксплерентные качества. Хозяйственно ценные хвойные и твёрдолиственные породы (в основном — виоленты) отстают в энергии роста от мягколиственных пород (эксплеренты) и уступают свои позиции в условиях «глобальной вырубке». Значительная часть

ценных лесных культур, не получив должного ухода, зарастает мягколиственными породами, списывается или переводится в подпологовые.

В структуре лесного фонда возрастает роль достаточно устойчивых серийных и производных лесов с высоким участием пионерно-серийных пород на всех этапах лесных сукцессий. Породный состав и возрастная структура древостоев подвержены существенным изменениям [19, 20].

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

Информация о складывающихся в надсистеме условиях передается всем ее подсистемам, даже относительно стабилизированным в особо охраняемых природных территориях (ООПТ) или на особо защитных участках леса (ОЗУ). Скорость и интенсивность передачи информации по уровням системной организации имеет свои особенности. Сравнительно быстро и со сходными последствиями информация о воздействии на лесные системы распространяется в системах, близких типологически (геохорах), а наиболее интенсивная передача информации — в системах, близких территориально (геомерах) [9].

Передача информации на разные уровни системной организации лесной биоты может быть выявлена по изменениям лесорастительных условий или по стратегии жизни основных лесообразователей. Оценка лесов по наличию или отсутствию преобладающих, эдификаторных, индикаторных видов должна дополняться использованием индикаторных возможностей типов стратегии, что, по нашему мнению, можно использовать в научной работе и в ходе реализации учебно-образовательных программ [21].

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

Выводы

Практически все восстановительные сукцессии в условиях массового разрушения лесной биоты как ведущего средообразующего фактора приобретают экзогенный характер и существенно отличаются от «типовых» восстановительных смен наблюдаемых в устойчивых лесах [2]. В условиях утраты лесами устойчивости, способности к восстановлению в исходно-коренное состояние лесовосстановительные процессы приобретают незавершенный характер, а лесообразователи проявляют разные свойства.

По «поведению» (проявленным в жизненной стратегии свойствам) дубрав можно судить о масштабах происходящих изменений лесообразовательного процесса. Понятие о информационном потенциале как совокупности проявленных и скрытых свойств позволяет учесть особенности адаптивной стратегии лесообразователей, исследовать происходящие изменения условий местообитания лесов. Поведение или стратегия жизни растений имеют адаптивный характер [1] и в данной связи пригодны для индикации состояния природной среды. Свойства биоты и закономерности их проявления лежат в основе эволюции приспособлений, в значительной мере определяют проявление и изменение всех признаков биоты, включая типы лесных сообществ.

Дальнейшее развитие фитосоциологии на основе отечественной традиции [1, 3–5, 8–10] и с привлечением теории экосистем [13] позволяет эффективнее оценивать тенденции динамики лесов и способствует совершенствованию лесного дела в современных условиях хозяйствования.

Список литературы

- [1] Комарова Т.А. К вопросу о закономерностях вторичных сукцессий в лесах Южного Сихотэ-Алиня // Динамические процессы в лесах Дальнего Востока. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1984. С. 21–36.
- [2] Комарова Т.А., Прохоренко Н.Б., Глушко С.Г., Терехина Н.В. Послепожарные сукцессии в лесах Сихотэ-Алиня с участием *Pinus koraiensis* Siebold et Zucc. Методологические положения и методические подходы в их изучении. СПб.: Свое издательство, 2017. 402 с.
- [3] Работнов Т.А. Фитоценология. М.: МГУ, 1992. 352 с.
- [4] Раменский Л.Г. Введение в комплексное почвенно-геоботаническое исследование земель. М.: Сельхозгиз, 1938. 620 с.
- [5] Сукачев В.Н. Растительные сообщества (Введение в фитосоциологию). Л.; М.: Книга, 1928. 232 с.
- [6] Глушко С.Г., Манюкова И.Г., Прохоренко Н.Б. Восстановление дубрав Среднего Поволжья // Вестник Омского ГАУ, 2017. № 3(27). С. 56–61.
- [7] Прохоренко Н.Б., Глушко С.Г., Курбанова С.Г. Структурные и экологические особенности широколиствен-

ных лесов подтаежной подзоны на Северо-Западе Татарстана // Сибирский лесной журнал, 2019. № 6. С. 126–137.

- [8] Сукачев В.Н. Программа и методика биогеоценологических исследований / под ред. В.Н. Сукачева, Н.В. Дылиса. М.: Наука, 1966. 334 с.
- [9] Сочава В.Б. Растительные сообщества и динамика природных систем // Докл. Института географии Сибири и Дальнего Востока, 1968. Вып. 20. С. 12–22.
- [10] Колесников Б.П. Генетический этап в лесной типологии и его задачи // Лесоведение, 1974. № 2. С. 3–20.
- [11] Курнаев С.Ф. Лесорастительное районирование подзоны южной тайги и хвойно-широколиственных лесов европейской части СССР. М.: МЛТИ, 1958. 22 с.
- [12] Kurbanova S.G., Prokhorenko N.B. Problem of the study and regeneration of small rivers on Tatarstan territory // International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 17, Ecology, Economics, Education and Legislation, 2017, pp. 11–18.
- [13] Tansley A.G. The use and abuse of vegetation concept and terms // Ecology, 1935, vol. 16, no. 3, pp. 284–307.
- [14] Теринов Н.Н., Андреева Е.М., Залесов С.В., Луганский Н.А., Магасумова А.Г. Восстановление еловых лесов: теория, отечественный опыт и методы решения // ИВУЗ Лесной журнал, 2020. № 3. С. 9–23. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-9-23
- [15] Яковлев А.С., Яковлев И.А. Дубравы Среднего Поволжья. Йошкар-Ола: Марийский ГТУ, 1999. 351 с.
- [16] Лепехин А.А., Чеканышкин А.С. Рост и жизнеспособность дуба черешчатого в изреженных рубками ухода насаждениях // ИВУЗ. Лесной журнал, 2018. № 6. С. 70–77. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.6.70
- [17] Добрынин А.П. Дубовые леса Российского Дальнего Востока (биология, география, происхождения) // Тр. Ботан. садов ДВО РАН. Т. 3. Владивосток: Дальнаука, 2000. 260 с.
- [18] Семенов М.А., Высоцкий А.А., Пашенко В.И. Прогноз адаптивных приспособлений в лесном хозяйстве в связи с возможными климатическими изменениями // ИВУЗ Лесной журнал, 2019. № 5. С. 57–69. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.57
- [19] Мельник Л.П. Динамика породного состава в условиях простой свежей субори Никольской лесной дачи // Леса Евразии — Леса Поволжья: Материалы XVII Междунар. конф. молодых ученых, посвященной 150-летию со дня рождения проф. Г.Ф. Морозова, 95-летию Казанского государственного аграрного университета и Году экологии в России, Казань, 22–28 октября 2017 г. М.: Маска, 2017. С. 79–81.
- [20] Мельник Л.П., Вронская А.М. Динамика видовой и возрастной структуры лесного фонда Никольской лесной дачи // Леса Евразии — Леса Поволжья: Материалы XVII Междунар. конф. молодых ученых, посвященной 150-летию со дня рождения проф. Г.Ф. Морозова, 95-летию Казанского государственного аграрного университета и Году экологии в России, Казань, 22–28 октября 2017 г. М.: Маска, 2017. С. 82–84.
- [21] Галиуллин И.Р., Глушко С.Г. Лесное образование в Казанском государственном аграрном университете // Леса Евразии — Леса Поволжья: Материалы XVII Междунар. конф. молодых ученых, посвященной 150-летию со дня рождения проф. Г.Ф. Морозова, 95-летию Казанского государственного аграрного университета и Году экологии в России, Казань, 22–28 октября 2017 г. М.: Маска, 2017. С. 12–15.

Сведения об авторах

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

Галиуллин Ильфир Равилович — канд. с.-х. наук, доцент кафедры таксации и экономики лесной отрасли ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет», ilfir.79@mail.ru

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

Поступила в редакцию 09.10.2020.

Принята к публикации 28.10.2020.

IMPLEMENTATION OF TREE SPECIES STRATEGY DURING PROGRESSIVE SUCCESSIONS

S.G. Glushko¹, I.R. Galiullin¹, N.B. Prokhorenko²

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

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

glushkosg@mail.ru

On the example of regeneration succession in forests, the features of silvicultural properties of the main forest-forming species growing in oak forests of the Middle Volga region are considered. The conclusion is made about the predominance of pioneer-serial forest communities formed by pioneer species in the study area. The pioneer species, which differ significantly in their silvicultural properties from the so-called «primary forest species», are predominant in modern forests. It is shown that at the later stages of reforestation successions, pioneer-serial forest communities are of great importance, the productivity of which becomes stable. The incomplete nature of progressive successions in the surveyed forests was revealed. To restore primary forests, a set of additional measures is required to facilitate the forests reconstruction and the entire forest fund of the region. The mass destruction of forests influences the processes of forest growing conditions and it is determined as a topical issue for further study. The connection between changes in the main forest species and forest communities and changes in forest growing conditions has been established. It is indicated that deforestation massively destroys the biotic environment and alters environmental processes, being the reason for silvicultural properties change in forest plants and their communities. The development of silvicultural properties is adaptive, in this regard, deforestation, with massive destruction of the biotic environment and a corresponding change in environmental processes, contributes to the development of properties inherent in pioneer-serial forest communities. With the degradation of primary forests, a change in the main forest species and forest communities that make up modern forests is noted. Many silvicultural properties inherent in primary forests are not developed in modern conditions. Instead of primary forests, secondary forests are spread, derivative, with other silvicultural properties and their mdevelopment in the form of a complex characteristic of behavior or life strategy. The properties manifested by forest communities and individual species need to be generalized for further research. We have proposed to combine all the properties of forests into the concept of information potential. The information potential of forests can be used to study the features of the silvicultural properties in a changing natural environment.

Keywords: forest successions, information, forest properties, indication of conditions

Suggested citation: Glushko S.G., Galiullin I.R., Prokhorenko N.B. *Realizaciya strategii lesoobrazovatelej v hode vosstanovitel'nyh sukcesij* [Implementation of tree species strategy during progressive successions]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 1, pp. 5–12. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-5-12

References

- [1] Komarova T.A. *K voprosu o zakonmernostyakh vtorichnykh suksessiy v lesakh Yuzhnogo Sikhote-Alinya* [On the patterns of secondary successions in the forests of the South Sikhote-Alin] *Dinamicheskie protsessy v lesakh Dal'nego Vostoka* [Dynamic processes in the forests of the Far East]. Vladivostok: Far Eastern Scientific Center, Academy of Sciences of the USSR, 1984, pp. 21–36.
- [2] Komarova T.A., Prokhorenko N.B., Glushko S.G., Terekhina N.V. *Poslepozharnye suksessii v lesakh Sikhote-Alinya s uchastiem Pinus koraiensis Siebold et Zucc. Metodologicheskie polozeniya i metodicheskie podkhody v ikh izuchenii* [Post-fire successions in the Sikhote-Alin forests with the participation of *Pinus koraiensis* Siebold et Zucc. Methodological provisions and methodological approaches in their study]. St. Petersburg: Svoe izdatel'stvo, 2017, 402 p.
- [3] Rabotnov T.A. *Fitotsenologiya* [Phytocenology]. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 1992, 352 p.
- [4] Ramensky L.G. *Vvedenie v kompleksnoe pochvenno-geobotanicheskoe issledovanie zemel* [Introduction to a comprehensive soil-geobotanical study of land]. Moscow: Selkhozgiz, 1938, 620 p.
- [5] Sukachev V.N. *Rastitelnye soobshestva (Vvedenie v fitosociologiyu)* [Plant communities (Introduction to phytosociology)]. Leningrad–Moscow: Kniga [Book], 1928, 232 p.

- [6] Glushko S.G., Manyukova I.G., Prokhorenko N.B. *Vosstanovlenie dubrav Srednego Povolzh'ya* [Restoration of oak forests of the Middle Volga]. *Vestnik Omskogo GAU* [Bulletin of the Omsk State Agrarian University], 2017, no. 3 (27), pp. 56–61.
- [7] Prokhorenko N.B., Glushko S.G., Kurbanova S.G. *Strukturnye i ekologicheskie osobennosti shirokolistvennykh lesov podtaezhnoy podzony na Severo-Zapade Tatarstana* [Structural and environmental features of broad-leaved forests of the subtaiga subzone in the North-West of Tatarstan]. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* [Siberian Forest Journal], 2019, no. 6, pp. 126–137.
- [8] Sukachev V.N. *Programma i metodika biogeotsenologicheskikh issledovaniy* [Program and methodology of biogeocenological studies] / eds. V.N. Sukachev, N.V. Dyslis. Moscow: Nauka, 1966, 334 p.
- [9] Sochava V.B. *Rastitelnye soobshchestva i dinamika prirodnih sistem* [Plant communities and the dynamics of natural systems]. *Dokl. instituta geografii Sibiri i Dalnego Vostoka* [Doc. Institute of Geography of Siberia and the Far East], 1968, iss. 20, pp. 12–22.
- [10] Kolesnikov B.P. *Geneticheskii etap v lesnoy tipologii i ego zadachi* [The genetic stage in the forest typology and its tasks]. *Russian J. Forest Science*, 1974, no. 2, pp. 3–20.
- [11] Kurnaev S.F. *Lesorastitel'noe rayonirovanie podzony yuzhnoy taygi i khvoynno-shirokolistvennykh lesov evropeyskoy chasti SSSR* [Forest-growing zoning of the subzone of the southern taiga and coniferous-deciduous forests of the European part of the USSR]. Moscow: MLTI, 1958, 22 p.
- [12] Kurbanova S.G., Prokhorenko N.B. Problem of the study and regeneration of small rivers on Tatarstan territory. International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 17, Ecology, Economics, Education and Legislation, 2017, pp. 11–18.
- [13] Tansley A.G. The use and abuse of vegetation concept and terms. *Ecology*, 1935, vol. 16, no. 3, pp. 284–307.
- [14] Terinov N.N., Andreeva E.M., Zalesov S.V., Luganskiy N.A., Magasumova A.G. *Vosstanovlenie elovykh lesov: teoriya, otechestvennyy opyt i metody resheniya* [Restoration of Spruce Forests: Theory, National Practice and Problem Solving]. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 3, pp. 9–23. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-9-23
- [15] Yakovlev A.S., Yakovlev I.A. *Dubravyy Srednego Povolzh'ya* [Oaklands of the Middle Volga]. Yoshkar-Ola: Mari State Technical University, 1999, 351 p.
- [16] Lepyohin A.A., Chekanyshkin A.S. *Rost i zhiznesposobnost' duba chereschatogo v izrezhennykh rubkami uhoda nasazhdeniyah* [Growth and Vitality of English Oak in Plantations after Improvement Thinning]. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2018, no. 6, pp. 70–77. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.6.70
- [17] Dobrynin A.P. *Dubovyye lesa Rossijskogo Dal'nego Vostoka (biologiya, geografiya, proiskhozhdeniya)* [Oak forests of the Russian Far East (biology, geography, origin)]. Tr. Botan. sadov DVO RAN. T. 3. [Proceedings of the Botanical Gardens of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; vol. 3]. Vladivostok: Dalnauka, 2000, 260 p.
- [18] Semenov M.A., Vysotskiy A.A., Pashchenko V.I. *Prognoz adaptivnykh prispособleniy v lesnom khozyaystve v svyazi s vozmozhnymi klimaticheskimi izmeneniyami* [Adaptation Scenarios in Forest Management Due to the Possible Climate Changes]. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 5, pp. 57–69. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.57
- [19] Mel'nik L.P. *Dinamika porodnogo sostava v usloviyakh prostoy svezhey subori Nikol'skoy lesnoy dachi* [The dynamics of the species composition in the conditions of a simple fresh subori Nikolskaya forest cottage]. *Lesa Evrazii — Lesa Povolzh'ya: Materialy XVII Mezhdunar. konf. molodykh uchennykh, posvyashchennoy 150-letiyu so dnya rozhdeniya prof. G.F. Morozova, 95-letiyu Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta i Godu ekologii v Rossii, Kazan, 22–28 oktyabrya 2017 g.* [Forests of Eurasia — Forests of the Volga Region: Materials of the XVII International Conf.] Moscow: Maska, 2017, pp. 79–81.
- [20] Mel'nik P.G., Vronskeya A.M. *Dinamika vidovoy i vozrastnoy struktury lesnogo fonda Nikol'skoy lesnoy dachi* [The dynamics of the species and age structure of the forest fund of the Nikolskaya forest dacha]. *Lesa Evrazii — Lesa Povolzh'ya: Materialy XVII Mezhdunar. konf. molodykh uchennykh, posvyashchennoy 150-letiyu so dnya rozhdeniya prof. G.F. Morozova, 95-letiyu Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta i Godu ekologii v Rossii, Kazan, 22–28 oktyabrya 2017 g.* [Forests of Eurasia — Forests of the Volga Region: Materials of the XVII International Conf.] Moscow: Maska, 2017, pp. 82–84.
- [21] Galiullin I.R., Glushko S.G. *Lesnoe obrazovanie v Kazanskom gosudarstvennom agrarnom universitete* [Forest education at Kazan State Agrarian University]. *Lesa Evrazii — Lesa Povolzh'ya: Materialy XVII Mezhdunar. konf. molodykh uchennykh, posvyashchennoy 150-letiyu so dnya rozhdeniya prof. G.F. Morozova, 95-letiyu Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta i Godu ekologii v Rossii, Kazan, 22–28 oktyabrya 2017 g.* [Forests of Eurasia — Forests of the Volga Region: Materials of the XVII International Conf.] Moscow: Maska, 2017, pp. 12–15.

Authors' information

Glushko Sergey Gennadievich — Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor of the Kazan State Agrarian University, glushkosg@mail.ru

Galiullin Ilfir Ravilovich — Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor of the Kazan State Agrarian University, ilfir.79@mail.ru

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

Received 09.10.2020.

Accepted for publication 28.10.2020.

БИОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДРЕВЕСИНЫ ЕЛИ СИБИРСКОЙ (*PICEA OBOVATA* LEDEB.) КАК ОТРАЖЕНИЕ ЖИЗНЕННОГО СОСТОЯНИЯ РАСТЕНИЙ

К.Е. Ведерников¹, Е.А. Загребин¹, И.Л. Бухарина¹, П.А. Кузьмин²

¹ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», 426034, г. Ижевск, ул. Университетская, д. 1

²ФГАОУ ВО «Елабужский институт Казанского федерального университета», Елабужский институт, 423604, г. Елабуга, ул. Казанская, д. 89

wke-les@rambler.ru

Представлены материалы по изучению химического состава древесины особей различного жизненного состояния ели сибирской *Picea obovata* Ledeb. в условиях распространения большого елового кородея *Ips typographus* L. Выдвинуто предположение о различии химической структуры древесины у особей ели сибирской в местах массового усыхания, обуславливающей ее заселяемость вредителями. Изучены растения различного жизненного состояния относительно содержания водорастворимых, смолоподобных экстрактивных веществ и танинов. Полученные данные были подвергнуты статистической обработке. По результатам проведенных исследований выявлено, что на общее содержание экстрактивных веществ влияют жизненное состояние особей и условия произрастания, что с ухудшением состояния растений происходит увеличение экстрактивных веществ. Общее увеличение экстрактивных веществ происходит в связи с увеличением группы водорастворимых веществ, а именно танинов. Наибольшее содержание всех групп метаболитов (в т. ч. и танинов) отмечено у особей удовлетворительного жизненного состояния.

Ключевые слова: еловые насаждения, массовое усыхание, экстрактивные вещества, танины, устойчивость

Ссылка для цитирования: Ведерников К.Е., Загребин Е.А., Бухарина И.Л., Кузьмин П.А. Биохимические особенности древесины ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) как отражение жизненного состояния растений // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 1. С. 13–21. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-13-21

Еловые древостои образуют вечнозеленые темнохвойные леса в пределах Северного полушария и являются значительным «углеродным пулом». Ухудшение состояния темнохвойных лесов, которое в ряде случаев сопровождается их гибелью — процесс очень динамичный, который охватывает все Северное полушарие, затрагивая все лесообразующие виды [1].

В Российской Федерации основные площади еловых древостоев представлены на севере Восточно-Европейской равнины, где они образуют ландшафт европейской тайги [2].

Причины деградации и высыхания лесов различны. Некоторые авторы связывают повреждение темнохвойных лесов непосредственно с загрязнением окружающей среды. Например, Т. Хласны и З. Ситкова в качестве основных причин деградации лесов в западной части Карпат называют загрязнение воздуха и нарушение их питания [3]. Однако не следует исключать и роль природных стрессовых факторов. Скорее всего, высыхание темнохвойных лесов является результатом сочетания нескольких причин. Например, Н.И. Федоров и др. связывали массовое усыхание ели в лесах Белоруссии с экстремальными засухами, причем этот эффект усиливался вследствие техногенного загрязнения, после чего ослабленные деревья подвергались поражению стволовыми вредителями [4]. Среди ведущих можно выделить такие при-

чины высыхания, как неравномерность осадков, переувлажнение, распространение паразитических грибов, динамику ксилофагов, эдафические условия произрастания [5–7].

Масштабы деградации коренных лесов бореальной зоны свидетельствует о влиянии глобальных изменений, происходящих в биосфере, в том числе и в связи с деятельностью человека [1, 8].

В Европейской части России особую опасность вызывает гибель темнохвойных лесов. Так, в Архангельской обл. наблюдается гибель хвойных с 1997 г., при этом пики приходились на 2004–2005 гг. и 2008–2012 гг. [9]. Этот процесс весьма динамичен и охватывает практически все регионы Европейской части России. Рассеянные очаги усыхания ели встречаются в Ленинградской, Новгородской, Псковской областях и Карелии, отмечены они в Московской, Брянской и Калужской областях [10, 11], а также фиксируются в предгорьях Урала [12]. Эта проблема актуальна и для Удмуртии, где еловые леса доминируют [13].

Цель работы

Цель работы — изучение химического состава древесины особей различного жизненного состояния ели сибирской *Picea obovata* Ledeb. в условиях распространения большого елового кородея *Ips typographus* L.

Материалы и методы исследования

Исследования были проведены на территории Удмуртской Республики площадью — 42,06 тыс. км². Удмуртия расположена в Европейской части РФ в бассейнах рек Камы и Вятки к западу от Уральских гор между параллелями 56°00' и 58°30' с. ш. и меридианами 51°15' и 54°30' в. д. Территория республики вытянута с севера на юг примерно на 320 км, с запада на восток — на 200 км. Значительная вытянутость территории с севера на юг и сложный рельеф обуславливают значительные отличия по показателям температуры и влажности воздуха, ветрового режима, количеству осадков между северной и южной ее частями. Территория Удмуртии расположена в пределах двух ландшафтных зон: таежной (бореальной) и подтаежной (бореально-суббореальной), а также в пределах двух лесорастительных зон: таежной и

хвойно-широколиственных лесов. Зональная граница совпадает с северной границей ареала дуба (*Quercus*) и лещины (*Corylus*), условно ее проводят между населенными пунктами республики Вавож — Нылга — Ижевск-Воткинск [14] (рис. 1).

Для оценки таксационных параметров и состояния еловых насаждений были заложены пробные площади (ПП) размером 100×100 м в трех лесничествах — Завьяловском, Яганском, Можгинском, располагающихся в подтаежной ландшафтной зоне (лесорастительной зоне хвойно-широколиственных лесов). В каждом лесничестве были заложены по три пробные площади. Пробные площади закладывались в насаждениях с преобладанием ели, в местах массового усыхания деревьев, в кисличных типах леса (E_{kc}).

Для определения основных количественных и качественных показателей насаждения применялся перечислительный метод таксации. Диаметр деревьев определяли с помощью мерной вилки, возраст — с помощью возрастного бурава Haglof-350 мм, высоту — с помощью высотомера Forestry Pro Nikon. Таксационные параметры насаждения — средний диаметр, среднюю высоту, средний возраст, полноту, состав определяли по общепринятой методике [15].

По жизненному состоянию деревья подразделили на три группы: 1) хорошего (крона густая или слегка изрежена, хвоя зеленая или светло-зеленая, отдельные ветви засохли); 2) удовлетворительно (крона ажурная; хвоя светло-зеленая матовая; прирост ослабленный, менее половины обычного; усыхание ветвей — до 50 %; наличие на стволе механических повреждений, имеются признаки первичного повреждения ксилофагами и/или дереворазрушающими грибами); 3) неудовлетворительно (усыхание ветвей до 2/3 кроны; крона сильно ажурная; хвоя от желто-зеленой до красно-бурой или отсутствует; рост очень слабый или отсутствует; кора частично опала, есть погибшие особи). Для изучения биохимических особенностей древесины ели в пределах каждой группы отбирали по три особи.

У растений различного жизненного состояния образцы древесины отбирали в осенний период на высоте 0,3 м от корневой шейки дерева. Содержание экстрактивных веществ определяли путем горячей отгонки в аппарате Сокслета: водорастворимые вещества — горячей водой, смолоподобные вещества — спирто-толуольной смесью. Содержание танинов в растворе определяли спектрофотометром ПЭ-5400УФ при длине волны 277 нм [16].

Статистическую обработку результатов исследования проводили с использованием пакета статистических программ Statistica 5.5. Использовались методы кластерного и дисперсионного (метод множественного сравнения LCD-test) анализов.

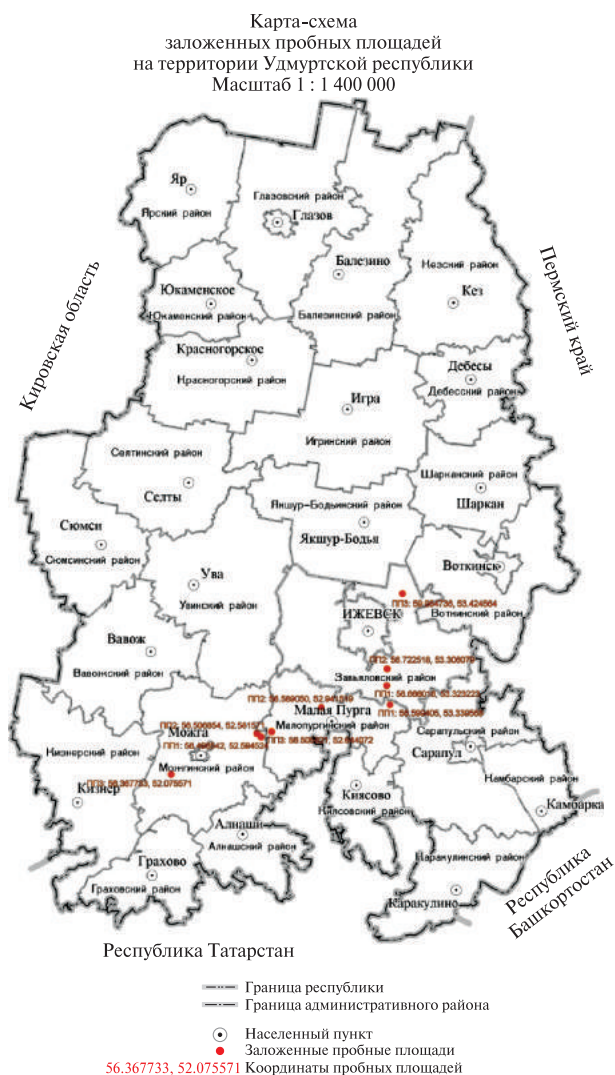


Рис. 1. Карта-схема расположения пробных площадей на территории Удмуртской Республики

Fig. 1. Schematic map of the test plots on the territory of the Udmurt Republic

Результаты исследования

Насаждения на исследуемых ПП характеризуются низкой полнотой (густотой) деревьев основного яруса, абсолютная полнота варьирует от 2,95 до 11,1 м²/га, с большим количеством сухостойных деревьев. Все исследуемые насаждения относятся к средневозрастным (табл. 1).

По данным перечислительной таксации, на всех исследуемых участках отмечен довольно большой запас сухостойной древесины. Ее запас существенно разнится по ПП: 31,1...178,1 м³/га. Таким образом, возрастает риск возникновения и распространения лесных пожаров. На ПП в Яганском лесничестве запас отмершей древесины превышает запас древесины живых деревьев, а в Завьяловском лесничестве на сухостойную древесину приходится более 50 % запаса древесины живых деревьев. Состояние еловых насаждений на ПП в Можгинском лесничестве оказалось лучше по сравнению с насаждениями в других лесничествах. Полнота в насаждении выше, чем на ПП в других лесничествах.

Основной причиной ослабления и гибели ели на территории Удмуртии является изменение

природно-климатических условий, способствующее распространению патогенных организмов, в том числе короеда-типографа (*Ips typographus*) [17]. Это подтверждают и наши исследования. На погибших деревьях выявлены характерные маточные следы ксилофага, кроме ПП1 и ПП3 в Можгинском лесничестве.

Сравнительное исследование химической структуры древесины проводилось различными методами статистической обработки.

Кластерный анализ позволил объединить изучаемые показатели в группы по сходным признакам (параметрам) и показал, что районы исследования по совокупности биохимических параметров подразделяются на два кластера: в первом объединены особи ели неудовлетворительного жизненного состояния, во втором — особи ели хорошего и удовлетворительного жизненного состояния (рис. 2).

Для дальнейшей интерпретации полученных данных нами был использован дисперсионный анализ по перекрестно-иерархической схеме, в которой в качестве факторов выступали место исследования (лесничество и ПП) и состояние растений.

Т а б л и ц а 1

Средние таксационные характеристики насаждений на пробных площадях

Average taxation characteristics of plantings on trial plots

№ пробной площади	Лесничество, участковое лесничество, квартал, выдел	Средний возраст ± ошибка среднего, лет	Средняя высота ± ошибка среднего, м	Средний диаметр (на высоте 1,3 м) ± ошибка среднего, см	Абсолютная полнота		Запас сухостойной древесины, м ³	Состав
					без учета сухостоя, м ² /га	с учетом сухостоя, м ² /га		
1	Завьяловское, Пригородное 78; 3	70 ± 2,3	21 ± 0,6	27,9 ± 0,4	10,7	14,9	67,2	9Е1П+Б
					107,0			260 (47,7)
2	Завьяловское, Пригородное 158; 3	67 ± 3,8	23 ± 0,6	26,0 ± 0,3	11,1	17,9	87,5	9Е1П
					119,9			324 (38,3)
3	Завьяловское, Заречное 66; 18	60 ± 1,8	20 ± 0,8	26,9 ± 0,3	22,0	27,4	48,6	9Е1П+Ос
					198,0			464(25,6)
1	Яганское 115; 8	60 ± 1,7	18 ± 0,5	25,9 ± 0,8	6,0	16,6	93,8	10Е+П
					52,8			252 (50,8)
2	Яганское 214; 8	65 ± 1,6	22 ± 0,3	21,4 ± 0,4	2,95	5,9	31,1	10Е
					30,7			155 (56,1)
3	Яганское 363; 13	60 ± 1,1	18 ± 0,7	20,3 ± 0,2	7,0	15,1	71,5	10Е
					61,6			155 (57,4)
1	Можгинское, Пычасское 70; 24	60 ± 1,6	23 ± 0,6	25,7 ± 0,5	16,6	33,0	178,1	9Е1П+Лп
					178,8			383 (56,7)
2	Можгинское, Пычасское 68; 30	50 ± 1,1	20 ± 0,9	22,6 ± 0,3	15,2	25,5	99,5	9Е1П
					145,7			408 (50,2)
3	Можгинское, Нышинское 35; 12	60 ± 1,5	19 ± 0,5	19,1 ± 0,2	28,8	35,0	57,5	9Е1С+Б
					264,9			456 (20,1)

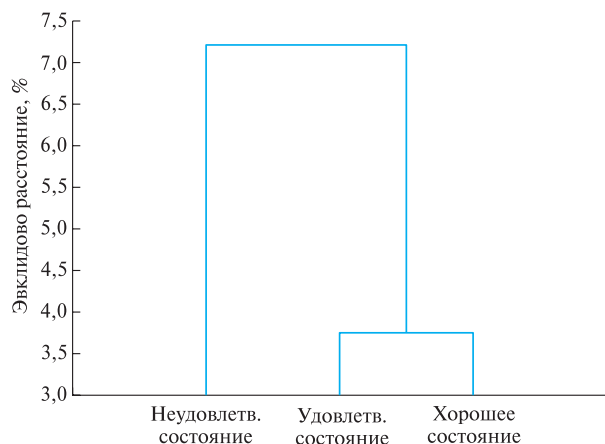


Рис. 2. Результаты кластерного анализа жизненного состояния особей по биохимическим показателям
Fig. 2. Cluster analysis results of the life state by biochemical parameters

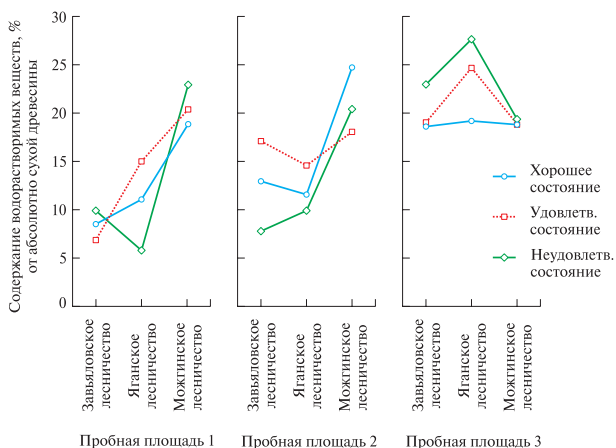


Рис. 3. Общее содержание экстрактивных веществ в древесине при взаимодействии факторов
Fig. 3. The total content of extractives in wood with the interaction of factors

Т а б л и ц а 2

Результаты дисперсионного анализа по общему содержанию экстрактивных веществ в древесине *Picea obovata* Ledeb.

Dispersion analysis for the total content of extractives in *Picea obovata* Ledeb wood

Факторы	df Effect	MS Effect	df Error	MS Error	F	p-level
1	2	307,51	54	13,66	22,51	<0,05
2	2	438,50	54	13,66	32,10	<0,05
3	2	8,70	54	13,66	0,64	>0,05
1; 2	4	184,41	54	13,66	13,50	<0,05
1; 3	4	23,52	54	13,66	1,72	>0,05
2; 3	4	41,82	54	13,66	3,06	<0,05
1; 2; 3	8	33,19	54	13,66	2,43	<0,05

Примечание.

1 — лесничества; 2 — пробные площади; 3 — жизненное состояние растений;
 df Effect — число степеней свободы для суммы квадратов отклонений выборочных средних групп от общего среднего;
 MS Effect — среднее значение суммы квадратов отклонений выборочных средних групп от общего среднего;
 df Error — число степеней свободы для суммы квадратов отклонений результатов наблюдений от выборочных средних групп;
 MS Error — среднее значение суммы квадратов отклонений результатов наблюдений от выборочных средних групп;
 F — выборочное значение F-статистики;
 p-level — вычисленный уровень значимости.

Результаты анализа показали, что на общее содержание экстрактивных веществ в древесине влияют место произрастания (лесничество и ПП) и взаимодействие факторов (лесничества, ПП и жизненное состояние растений) (табл. 2, рис. 3).

По результатам проведенных исследований, вариация экстрактивных веществ наблюдается в широком диапазоне: от 5,82 до 27,67 % а.с.с.

В Можгинском лесничестве вне зависимости от условий произрастания и жизненного состояния особей, статистически достоверных отличий между растениями нет. На наш взгляд, это обусловлено отсутствием реакции особей на раздражителей. В результате натурных обследований на ПП1 и ПП3 не был зафиксирован короед-типограф, а гибель растений в данных насаждениях обусловлена естественным отпадом деревьев. Однако на ПП2 были выявлены участки усыхания ели. Очаг погибающих (погибших) растений представлял собой локально расположенные растения — от 2 до 8 шт. У погибших растений на стволе наблюдались вылетные отверстия насекомых. На ПП2 у растений хорошего жизненного состояния выявлено достоверно более высокое общее содержание экстрактивных веществ по сравнению с особями удовлетворительного и неудовлетворительного жизненного состояния (см. рис. 3).

Определение компонентного состава экстрактивных веществ на фоне неблагоприятных факторов позволяет понять работу иммунного механизма растительного организма. Вещества, экстрагируемые горячей водой — как правило ингибированны в клеточную стенку, а смолоподобные вещества формируются в межклеточном пространстве.

Исследованиями по содержанию смолоподобных веществ в древесине выявлено, что условия произрастания являются значимым фактором ($p < 0,05$), при этом жизненное состояние растений не влияет на содержание этих веществ в древесине ($p > 0,05$), а по содержанию водорастворимых веществ, — что на количественное содержание этой группы существенное влияние

Таблица 3

Результаты дисперсионного анализа по содержанию водорастворимых экстрактивных веществ в древесине *Picea obovata* Ledeb.

Dispersion analysis results for the content of water-soluble extractives in *Picea obovata* Ledeb wood

Факторы	df Effect	MS Effect	df Error	MS Error	F	p-level
1	2	201,74	54	7,27	27,73	<0,05
2	2	502,29	54	7,27	69,05	<0,05
3	2	9,15	54	7,27	1,26	>0,05
1; 2	4	146,03	54	7,27	20,07	<0,05
1; 3	4	12,153	54	7,27	1,67	>0,05
2; 3	4	32,65	54	7,27	4,49	<0,05
1; 2; 3	8	16,11	54	7,27	2,21	<0,05

оказывают место произрастания (лесничество и ПП) и взаимодействие факторов (лесничества, ПП и жизненное состояние растений) (табл. 3, 4).

Таким образом, изменение содержания общего количества экстрактивных веществ связано с группой водорастворимых экстрактивных веществ (рис. 3, 4).

Водорастворимые экстрактивные вещества — это поли- и моносахариды, пектины, камеди, белки, красители, циклические спирты и танины. Танины, согласно научным публикациям, имеют важное за-

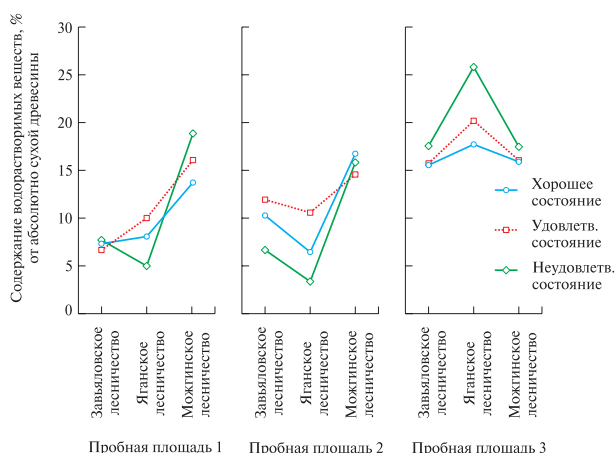


Рис. 4. Содержание водорастворимых экстрактивных веществ в древесине при взаимодействии факторов
Fig. 4. The content of water-soluble extractives in wood with the interaction of factors

щитное значение при воздействии на растения факторов негативного характера [18, 19]. Так согласно научной литературе вещества, ингибированные в клеточную стенку обладают больше защитными свойствами, в сравнении с веществами из межклеточного пространства [20–22].

Результаты проведенных исследований подтверждают ранее опубликованные данные. У деревьев *Picea obivata* Ledeb. наблюдается достоверное отличие по содержанию танинов в древесине в зависимости от жизненного состояния.

Таблица 4

Содержание веществ в древесине ели сибирской (*P. obovata* Ledeb.) различного жизненного состояния по лесничествам Удмуртской Республики (% от абсолютно сухого состояния древесины)

The content of substances in the wood of Siberian spruce (*P. obovata* Ledeb.) of various life states in the forestries of the Udmurt Republic (% of the absolutely dry state of wood)

Наименование веществ	Лесничество, участковое лесничество	Квартал, выдел	Жизненное состояние		
			Хорошее	Удовлетворительное	Неудовлетворительное
Общее содержание экстрактивных веществ	Завьяловское, Пригородное	78; 3	8,41 ± 0,04* 8,24...8,58**	6,78 ± 0,10 6,37...7,19	9,91 ± 1,74 2,43...17,38
		158; 3	12,99 ± 0,18 12,20...13,77	17,04±1,02 12,65...21,42	7,83 ± 1,28 2,32...13,33
	Завьяловское, Заречное	66; 18	18,57 ± 1,25 13,21...23,93	18,91 ± 0,96 14,79...23,03	23,02 ± 3,09 9,74...36,30
		Яганское	115; 8	11,06 ± 0,12 10,53...11,58	14,90 ± 0,21 14,00...15,81	5,82 ± 0,65 3,02...8,62
	214; 8		11,57 ± 0,16 10,87...12,27	14,49 ± 2,65 3,10...25,87	9,91 ± 1,74 2,43...17,38
	363;13		19,12 ± 0,73 15,99...22,25	24,62 ± 1,36 18,76...30,48	27,69 ± 5,62 3,50...51,87
	Можгинское, Пычасское	70; 24	18,78 ± 1,88 10,70...26,86	20,30 ± 1,55 13,63...26,96	22,97 ± 1,01 18,62...27,32
		68; 30	24,68 ± 5,73 0,02...49,34	18,07 ± 1,42 11,94...24,20	20,45 ± 2,85 8,19...32,71
	Можгинское, Нышинское	35; 12	18,78 ± 0,66 15,93...21,64	18,80 ± 0,43 16,94...20,65	19,30 ± 3,18 5,60...33,00

Окончание табл. 4

Наименование веществ	Лесничество, участковое лесничество	Квартал, выдел	Жизненное состояние		
			Хорошее	Удовлетворительное	Неудовлетворительное
Водорастворимые вещества	Завьяловское, Пригородное	78; 3	7,20 ± 0,20 6,33...8,07	6,62 ± 0,09 6,22...7,02	7,57 ± 1,58 0,79...14,36
		158; 3	10,25 ± 0,14 9,63...10,87	11,93 ± 0,57 9,48...14,37	6,63 ± 1,26 1,22...12,04
	Завьяловское, Заречное	66; 18	15,57 ± 0,95 11,49...19,65	15,67 ± 1,02 11,29...20,04	17,59 ± 2,25 7,93...27,25
	Яганское	115; 8	7,98 ± 0,57 5,53...10,44	9,98 ± 0,14 9,38...10,59	4,97 ± 0,44 3,09...6,85
		214; 8	6,41 ± 0,09 6,03...6,80	10,60 ± 2,33 0,58...20,62	3,34 ± 0,64 0,57...6,11
		363; 13	17,72 ± 0,33 16,29...19,15 16,29...19,1516,	20,22 ± 2,05 11,42...29,02	25,78 ± 5,62 1,60...49,96
	Можгинское, Пычасское	70; 24	13,65 ± 2,16 4,37...22,93	16,04 ± 1,31 10,39...21,69	18,92 ± 1,18 13,86...23,98
		68; 30	16,72 ± 0,33 15,29...18,15	14,61 ± 0,09 14,21...15,01	15,85 ± 0,93 11,86...19,84
	Можгинское, Нышинское	35; 12	15,83 ± 0,06 15,59...16,08	15,98 ± 0,83 12,42...19,55	17,45 ± 1,53 10,87...24,03
	Танины	Завьяловское, Пригородное	78; 3	6,63 ± 0,33 5,23...8,03	5,83 ± 0,08 5,48...6,18	4,05 ± 1,35 -1,73...9,84
158; 3			6,06 ± 0,09 5,69...6,43	5,39 ± 0,10 4,96...5,82	4,09 ± 0,57 1,63...6,55
Завьяловское, Заречное		66; 18	3,91 ± 0,54 1,57...6,25	3,09 ± 0,27 1,92...4,26	1,91 ± 0,29 0,65...3,17
Яганское		115; 8	6,48 ± 0,23 5,50...7,45	6,72 ± 0,09 6,31...7,13	3,30 ± 0,45 1,35...5,25
		214; 8	5,16 ± 0,07 4,85...5,47	7,78 ± 1,85 -0,19...15,74	2,45 ± 0,31 1,13...3,77
		363; 13	5,48 ± 0,67 2,62...8,34	12,53 ± 2,06 3,66...21,39	6,09 ± 3,64 -9,55...21,74
Можгинское, Пычасское		70; 24	7,28 ± 1,58 0,50...14,06	5,12 ± 1,29 -0,42...10,66	5,48 ± 0,62 2,83...8,13
		68; 30	8,01 ± 1,35 2,21...13,82	9,04 ± 2,82 -3,09...21,17	6,11 ± 0,92 2,16...10,06
Можгинское, Нышинское		35; 12	8,30 ± 1,19 3,17...13,43	8,89 ± 2,29 -0,94...18,73	7,44 ± 2,82 -4,71...19,59
Смолосодержащие вещества		Завьяловское, Пригородное	78; 3	1,21 ± 0,24 0,17...2,25	0,16 ± 0,00 0,14...0,17	2,33 ± 0,20 1,47...3,19
	158; 3		2,74 ± 0,04 2,58...2,90	5,11 ± 1,59 -1,72...11,94	1,20 ± 0,27 0,01...2,38
	Завьяловское, Заречное	66; 18	3,00 ± 0,50 0,57...5,14	3,25 ± 0,81 -0,24...6,74	5,43 ± 1,62 -1,56...12,41
	Яганское	115; 8	3,07 ± 0,48 1,00...5,14	4,92 ± 0,07 4,62...5,22	0,85 ± 0,22 -0,08...1,78
		214; 8	5,16 ± 0,07 4,85...5,47	3,89 ± 0,44 2,01...5,76	2,28 ± 0,41 0,52...4,05
		363; 13	1,39 ± 0,41 -0,39...3,17	4,40 ± 0,80 0,98...7,82	1,91 ± 0,02 1,83...1,98
	Можгинское, Пычасское	70; 24	5,13 ± 3,93 -11,77...22,03	4,26 ± 0,85 0,60...7,91	4,05 ± 0,19 3,25...4,84
		68; 30	7,96 ± 5,72 -16,66...32,58	3,45 ± 1,51 -3,06...9,96	4,60 ± 2,44 -5,91...15,10
	Можгинское, Нышинское	35; 12	2,95 ± 0,66 0,13...5,77	2,81 ± 1,11 -1,96...7,59	1,84 ± 1,66 -5,31...9,00

Примечание. * среднее ± ошибка среднего, ** доверительный интервал для среднего значения при $p < 0,05$

У растений хорошего и удовлетворительного состояния содержание танинов достоверно больше, чем у растений неудовлетворительного состояния (рис. 5).

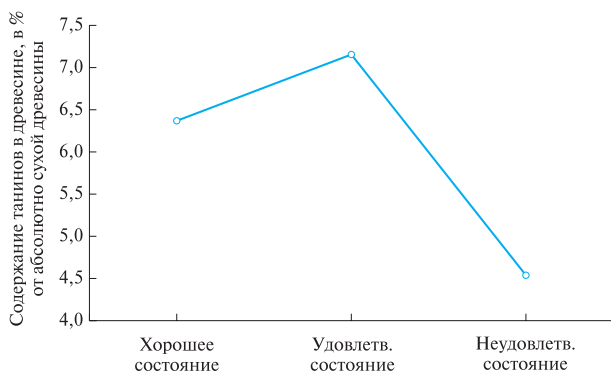


Рис. 5. Содержание танинов в древесине *Picea obiovata* Ledeb. в зависимости от жизненного состояния

Fig. 5. The content of tannins in the wood of *Picea obiovata* Ledeb. depending on the life state

Однако у растений удовлетворительного жизненного состояния отмечены значительные колебания по содержанию экстрактивных веществ, что может отражать нарушение иммунной системы растительного организма (см. табл. 4).

Выводы

Полученные результаты позволили выявить следующие закономерности. На общее содержание экстрактивных веществ влияют жизненное состояние особей и условия произрастания. Увеличение содержания общих экстрактивных веществ происходит в связи увеличением содержания группы водорастворимых экстрактивных веществ. Очевидно, установленное усиление процессов образования веществ данной группы (в отличие от смолоподобных) обусловлено повышением содержания танинов и является одной из стратегий метаболической защиты ели от поражения ксилофагами.

Наибольшее содержание всех групп метаболитов (в том числе танинов) отмечено у особей удовлетворительного жизненного состояния. Деревья ели сибирской имеют признаки усыхания и иные патологии ствола и кроны, тем не менее повышенное содержание экстрактивных веществ в ее древесине способствует функционированию механизмов защиты. В то же время значительное варьирование изучаемых биохимических показателей у этих деревьев, может свидетельствовать о возможном нарушении гомеостатических механизмов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-04-00353 А.

Список литературы

[1] Jose F. Negron Biological Aspects of Mountain Spruce Beetle in Lodgepole Spruce Stands of Different Densities

in Colorado // USA Forests, 2019, no. 10(1), p. 18. URL: <https://doi.org/10.3390/f10010018>

- [2] Теринов Н.Н., Андреева Е.М., Залесов С.В., Луганский Н.А., Магасумова А.Г. Восстановление еловых лесов: теория, отечественный опыт и методы решения // ИВУЗ Лесной журнал, 2020. № 3. С. 9–23. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-9-23.
- [3] Hlasny T., Grodzki W., Šramek V., Holusa J., Kulla L., Sitkova Z., Turcani M., Raczka G., Strzelinski P., Wegiel A. Spruce forest decline in the Beskids / Eds. Hlasny T., Sitkova Z. Zvolen: National Forest Centre-Forest Research Institute Zvolen, Czech University of Life Sciences Prague, Forestry and Game Management Research Institute Jiloviště-Strnady, 2010, p. 182.
- [4] Федоров Н.И., Сарнацкий В.В. Причинно-следственные связи массового усыхания ельников Беларуси в 1993–1998 годы // Лес XXI века: тез. докладов Междунар. практ. конф. Брянск 20–24 октября 2005 г., Брянск: БГТУ, 2005. С. 58.
- [5] Любарский Л.В. Санитарное состояние лесов Дальнего Востока и пути их оздоровления // Вопросы развития лесного хозяйства и лесной промышленности Дальнего Востока. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1955. 175 с.
- [6] Черненко Т.В., Бочкарев Ю.Н. Динамика еловых насаждений Кольского Севера в условиях воздействия природно-антропогенных факторов среды // Журнал общей биологии, 2013. Т. 74. № 4. С. 283–303.
- [7] Пукинская М.Ю. К методике изучения естественных нарушений в еловых лесах по дендрохронограммам // Ботанический журнал, 2014. Т. 99. № 6. С. 690–701.
- [8] Lohmander P. Optimal principles of forest management with consideration of global warming // Леса Евразии — Леса Поволжья: Материалы XVII Междунар. конф. молодых ученых, посвященной 150-летию со дня рождения профессора Г.Ф. Морозова, 95-летию Казанского государственного аграрного университета и Году экологии в России, 22–28 октября 2017 г. М.: Маска, 2017. С. 73–45.
- [9] Об утверждении Лесного плана Архангельской области. Указ Губернатора Архангельской области от 14.12.2018 г. №116-у. С. 44–45. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/2900201812190003> (дата обращения 21.04.2020).
- [10] Жигунов А.В., Семакова Т.А., Шабунин Д.А. Массовое усыхание лесов на Северо-Западе России // Материалы науч. конф., посвященной 50-летию Института леса Карельского научного центра РАН, 3–5 октября 2007 г. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. С. 42–52.
- [11] Алябьев А.Ф. Усыхание ельников Подмосковья // Вестник МГУЛ – Лесной вестник, 2013. № 6 (98). С. 159–166.
- [12] Иванчина Л.А., Залесов С.В. Влияние типа леса на устойчивость еловых древостоев Прикамья // Пермский аграрный вестник, 2017. № 1 (17). С. 38–43.
- [13] Ведерников К.Е., Бухарина И.Л., Загребин Е.А. Динамика площади еловых насаждений в Удмуртской Республике // Современные условия взаимодействия науки и техники: сб. статей Всерос. науч.-практ. конф., г. Тюмень, 5 апреля 2019 г. В 2 ч. Ч. 2. Уфа: Omega Scientific, 2019. С. 77–81.
- [14] География Удмуртии: природные условия и ресурсы / под ред. И.И. Рысина. Ижевск: Изд. дом «Удмуртский университет», 2009. Ч. 1. 256 с.
- [15] Ушаков А.И. Лесная таксация и лесоустройство. М.: МГУЛ, 1997. 176 с.
- [16] Оболенская А.В., Ельницкая З.П., Леонич А.А. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы. М.: Экология, 1991. 320 с.
- [17] Вахрашев К.В., Абсалямов Р.Р. Лесной комплекс Удмуртской Республики: состояние, проблемы, перспективы развития лесных отношений // Леса Евразии — Леса Поволжья: Материалы XVII Междунар. конф. молодых ученых, посвященной 150-летию со дня

- рождения профессора Г.Ф. Морозова, 95-летию Казанского государственного аграрного университета и Году экологии в России, 22–28 октября 2017 г. М.: Маска, 2017. С. 34–38.
- [18] Фуксман И.Л., Новицкая Л.Л., Исидоров В.А. Фенольные соединения хвойных деревьев в условиях стресса // Лесоведение, 2005. № 3. С. 4–10, 13.
- [19] Schofield J.A., Hagerman A.E., Harold A. Loss of tannins and other phenolics from willow leaf litter // J. Chem. Ecol., 1998, v. 24, pp. 1409–1421.
- [20] Hillis W.E. Heartwood and tree exudates. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1987, 268 p.
- [21] Kleist G.D.U. Schmitt Evidence of accessory compounds in vessel walls of Sapelli heartwood (*Entandrophragma cylindricam*) obtained by transmission electron microscopy // Holz Roh Werkst, 1999, no. 57, pp. 93–95.
- [22] Srinivasan U., Ung T., Taylor A., Cooper P. Natural durability and waterborne treatability of tamarack // Forest Prod. J., 1999, no. 49(1), pp. 82–87.

Сведения об авторах

Ведерников Константин Евгеньевич — канд. биол. наук, доцент кафедры инженерной защиты окружающей среды, ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», wke-les@rambler.ru

Загребин Егор Александрович — ассистент кафедры инженерной защиты окружающей среды, ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», i.am.yeti@yandex.ru

Бухарина Ирина Леонидовна — д-р биол. наук, зав. кафедрой инженерной защиты окружающей среды, ФГБОУ ВО Удмуртский государственный университет, buharin@udmlink.ru

Кузьмин Петр Анатольевич — канд. с-х наук, доцент кафедры биологии и химии, ФГАОУ ВО «Елабужский институт Казанского федерального университета», petrkuzman84@yandex.ru

Поступила в редакцию 05.10.2020.

Принята к публикации 16.11.2020.

PICEA OBOVATA LEDEB. WOOD BIOCHEMICAL CHARACTERISTICS AS STATE OF PLANTS

K.E. Vedernikov¹, E.A. Zagrebin¹, I.L. Bukharina¹, P.A. Kuzmin²

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Udmurt State University»

²Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan (Volga region) Federal University, Yelabuga Institute»

wke-les@rambler.ru

The process of forest destruction is very dynamic and covers the entire boreal zone of the Northern hemisphere. Against the background of deterioration of the sanitary condition of plantings, pathogenic organisms are activated. The article presents materials on the study of the chemical composition of wood of individuals of different life States of *Picea obovata* Ledeb. In the context of IPS typographus L. distribution It is suggested that there is a difference in the chemical structure of wood in individuals of Siberian spruce in places of mass drying, which affects the population of pests. Plants of various life States were studied for the content of water-soluble, resin-like extractives and tannins. The obtained data were subjected to statistical processing. The results of the research revealed that the overall content of extractive substances is influenced by the vital state of individuals and growing conditions. It was found that with the deterioration of the plant condition, there is an increase in extractive substances. The overall increase in extractive substances occurs due to an increase in the group of water-soluble substances, namely tannins. The highest content of all groups of metabolites (including tannins) was observed in individuals of a satisfactory life condition.

Keywords: spruce stands, mass drying, extractive substances, tannins, stability

Suggested citation: Vedernikov K.E., Zagrebin E.A., Bukharina I.L., Kuzmin P.A. *Biokhimicheskie osobennosti drevesiny eli sibirskoy (Picea obovata Ledeb.) kak otrazhenie zhiznennogo sostoyaniya rasteniy [Picea obovata Ledeb. wood biochemical characteristics as state of plants]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2021, vol. 25, no. 1, pp. 13–21. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-13-21*

References

- [1] Jose F. Negron Biological Aspects of Mountain Spruce Beetle in Lodgepole Spruce Stands of Different Densities in Colorado. USA Forests, 2019, no. 10(1), p. 18. URL: <https://doi.org/10.3390/f10010018>
- [2] Terinov N.N., Andreev E.M., Zalesov S.V., Lugansk N.A. Magzumova A.G. *Vosstanovlenie elovykh lesov: teoriya, otechestvennyj opyt i metody resheniya* [Restoration of spruce forests: theory, domestic experience and methods of solution] Lesnoy Zhurnal [Russian Forestry Journal], 2020, no. 3, pp. 9–23. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-9-23
- [3] Hlasny T., Grodzki W., Šramek V., Holusa J., Kulla L., Sitkova Z., Turcani M., Raczka G., Strzelinski P., Wegiel A. Spruce forest decline in the Beskids / Eds. Hlasny T., Sitkova Z. Zvolen: National Forest Centre-Forest Research Institute Zvolen, Czech University of Life Sciences Prague, Forestry and Game Management Research Institute Jiloviště-Strnady, 2010, p. 182.
- [4] Fedorov N. I., Sarnatsky V. V. *Prichinno-sledstvennyye svyazi massovogo usyhanija el'nikov Belarusi v 1993–1998 gody* [Cause-and-effect relationships of mass drying of spruce forests in Belarus in 1993–1998]. Les XXI veka: tezisy dokladov Mezhdunar. prakt. konf. [Forest of the XXI century: abstracts of the international practical conference] Bryansk 20–24 October 2005. Bryansk: BSTU, 2005, p. 58.

- [5] Lyubarskiy L.V. Sanitarnoe sostoyanie lesov Dal'nego Vostoka i puti ikh ozdorovleniya [Sanitary condition of the forests of the Far East and ways to improve them]. *Voprosy razvitiya lesnogo khozyaystva i lesnoy promyshlennosti Dal'nego Vostoka* [Questions of development of forestry and forest industry of the Far East]. Moscow-Leningrad: USSR Academy of Sciences, 1955, 175 p.
- [6] Chernen'kova T.V., Bochkarev Yu.N. *Dinamika elovykh nasazhdeniy kol'skogo severa v usloviyakh vozdeystviya prirodno-antropogennykh faktorov sredi* [Dynamics of spruce stands in the Kola North under the influence of natural and anthropogenic environmental factors]. *Zhurnal obshchey biologii* [Journal of General biology], 2013, vol. 74, no. 4, pp. 283–303.
- [7] Pukinskaya M.Yu. *K metodike izucheniya estestvennykh narusheniy v elovykh lesakh po dendrokronogrammam* [The methodology for the study of natural disturbances in the spruce forests on dendrochronology]. *Botanicheskiy zhurnal*, 2014, vol. 99, no. 6, pp. 690–701.
- [8] Lohmander P. Optimal principles of forest management with consideration of global warming. *Lesnaya Evrazii — Lesnaya Povolzh'ya: Materialy XVII Mezhdunarodnoy konferentsii molodykh uchenykh, posvyashchennoy 150-letiyu so dnya rozhdeniya professora G.F. Morozova, 95-letiyu Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta i Godu ekologii v Rossii* [Forests of Eurasia — Forests of the Volga region: Materials of the XVII International conference of young scientists dedicated to the 150th anniversary of the birth of Professor G.F. Morozov, the 95-th anniversary of the Kazan state agrarian University and the Year of ecology in Russia]. Moscow: Mask, 2017, pp. 73–45.
- [9] Ob utverzhdenii Lesnogo plana Arkhangel'skoy oblasti. Ukaz Gubernatora Arkhangel'skoy oblasti ot 14.12.2018 g. №116-u [About the approval of the Forest plan of the Arkhangel'sk region. Decree of the Governor of the Arkhangel'sk region from 14.12.2018 № 116-u], pp. 44–45. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/2900201812190003> (accessed 21.04.2020).
- [10] Zhigunov A.V., Semakova T.A., Shabunin D.A. *Massovoe usykhaniye lesov na Severo-Zapade Rossii* [Mass shrinking of forests in the North-West of Russia] *Materialy nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy 50-letiyu Instituta lesa Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Materials of the scientific conference dedicated to the 50th anniversary of the forest Institute of the Karelian scientific center of the Russian Academy of Sciences] 3–5 Oktober 2007. Petrozavodsk: Karnts RAS, 2007, pp. 42–52.
- [11] Alyab'ev A.F. *Usykhaniye el'nikov Podmoskov'ya* [Shrinking of spruce forests in the Moscow region]. *Bulletin of the Moscow state University of forest — Forest Bulletin*, 2013, no. 6 (98), pp. 159–166.
- [12] Ivanchina L.A., Zalesov S.V. Vliyaniye tipa lesa na ustoychivost' elovykh drevostoev Prikam'ya [Influence of the forest type on the stability of spruce stands in the Kama region.] *Permskiy agrarnyy vestnik* [Perm agricultural Bulletin], 2017, no. 1 (17), pp. 38–43.
- [13] Vedernikov K.E., Bukharina I.L., Zagrebin E.A. *Dinamika ploshchadi elovykh nasazhdeniy v Udmurtskoy Respublike* [Dynamics of the area of spruce stands in the Udmurt Republic]. *Sovremennyye usloviya vzaimodeystviya nauki i tekhniki: sbornik statey Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern conditions of interaction between science and technology: collection of articles of the all-Russian scientific and practical conference]. In 2 v. ch. 2. Ufa: Omega Scienic, 2019, pp. 77–81.
- [14] *Geografiya Udmurtii: prirodnye usloviya i resursy* [Udmurt Republic geography: natural conditions and resources]. Ed. I.I. Rysin. Izhevsk: «Udmurt University» publishing house, 2009, part. 1, 256 p.
- [15] Ushakov A.I. *Lesnaya taksatsiya i lesoustroystvo* [Forest taxation and forest management]. Moscow: MSFU, 1997, 176 p.
- [16] Obolenskaya A.V., El'nitskaya Z.P., Leonovich A.A. *Laboratornyye raboty po khimii drevesiny i tsellyulozy* [Laboratory work on the chemistry of wood and cellulose]. Moscow: Ecology, 1991, 320 p.
- [17] Vakhrashev K.V., Absalyamov R.R. *Lesnoy kompleks Udmurtskoy Respubliki: sostoyaniye, problemy, perspektivy razvitiya lesnykh otnosheniy* [Forest complex of the Udmurt Republic: state, problems and prospects of development of forest relations] *Lesnaya Evrazii — Lesnaya Povolzh'ya: Materialy XVII Mezhdunarodnoy konferentsii molodykh uchenykh, posvyashchennoy 150-letiyu so dnya rozhdeniya professora G.F. Morozova, 95-letiyu Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta i Godu ekologii v Rossii* [Forests of Eurasia — Forests of the Volga region: Materials of the XVII International conference of young scientists dedicated to the 150th anniversary of the birth of Professor G.F. Morozov, the 95th anniversary of the Kazan state agrarian University and the Year of ecology in Russia]. Moscow: Mask, 2017, pp. 34–38.
- [18] Fuksman I.L., Novitskaya L.L., Isidorov V.A. *Fenol'nye soedineniya khvoynykh derev'ev v usloviyakh stressa* [Phenolic compounds of coniferous trees under stress]. *Lesovedeniye* [Forest science], 2005, no. 3, pp. 4–10, 13.
- [19] Schofield J.A., Hagerman A.E., Harold A. Loss of tannins and other phenolics from willow leaf litter. *J. Chem. Ecol.*, 1998, v. 24, pp. 1409–1421.
- [20] Hillis W.E. *Heartwood and tree exudates*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1987, 268 p.
- [21] Kleist G.D.U. Schmitt Evidence of accessory compounds in vessel walls of Sapelli heartwood (Entandrophragma cylindricum) obtained by transmission electron microscopy. *Holz Roh Werkst*, 1999, no. 57, pp. 93–95.
- [22] Srinivasan U., Ung T., Taylor A., Cooper P. Natural durability and waterborne treatability of tamarack. *Forest Prod. J.*, 1999, no. 49(1), pp. 82–87.

Authors' information

Vedernikov Konstantin Evgen'evich — Cand. Sci. (Biology), Associate Professor of the Department of environmental engineering of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Udmurt State University», wke-les@rambler.ru

Zagrebin Egor Aleksandrovich — Assistant of the Department of environmental engineering of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Udmurt State University», i.am.yeti@yandex.ru

Bukharina Irina Leonidovna — Dr. Sci. (Biology), Head of the Department of environmental engineering of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Udmurt State University», buharin@udmlink.ru

Kuz'min Petr Anatol'evich — Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor of the Department of biology and chemistry of the Federal state Autonomous educational institution of Higher Education Kazan (Volga region) Federal University, Elabuga Institute, petrkuzmin84@yandex.ru

Received 05.10.2020.

Accepted for publication 16.11.2020.

НАСЛЕДСТВЕННАЯ ОБУСЛОВЛЕННОСТЬ ВИДОСПЕЦИФИЧНОСТИ ТОПОЛЕЙ ПО СОДЕРЖАНИЮ КРАХМАЛА В ТКАНЯХ ПОБЕГОВ

В.П. Бессчетнов, Н.Н. Бессчетнова, П.В. Бессчетнов

Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия, 603107, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 97

lesfak@mail.ru

Изучена наследственная обусловленность видоспецифичности восьми видов тополей по содержанию крахмала в тканях их побегов. Объектами исследований выступали: тополь белый пирамидальный (*P. alba* L., *f. pyramidalis*); тополь черный (*P. nigra* L.); тополь черный пирамидальный (*P. nigra*, *var. italica* Münchh.); тополь китайский (*P. Simonii* Carr.); тополь бальзамический (*P. balsamifera* L.); тополь лавролистный (*P. laurifolia* Ledeb.); тополь белый (*P. alba* L.); осина (*P. tremula* L.). Концентрацию крахмала в различных тканях годичных побегов устанавливали в ходе микроскопических исследований с гистохимическим окрашиванием препаратов. Статистическая обработка фактического материала выполнена с привлечением однофакторного и двухфакторного дисперсионного анализа. Установлено, что виды тополей различались по наличию крахмала в разных тканях. Тополь белый пирамидальный и его типичная форма проявили сходство между собой по его содержанию. Осина отличалась от них несколько большим количеством этого вещества. Виды, входящие в одну секцию, имели большее сходство между собой при заметном отличии от представителей других секций. Разница в оценках между секциями черных и бальзамических тополей менее заметна, чем между каждой из этих секций и белыми тополями. Влияние генотипа на формирование физиологических различий достигает 72 %. Различия между учетными деревьями одного вида выражены в меньшей мере, чем между сравниваемыми таксономическими группами, и не достигают уровня существенных. Видоспецифичность тополей, произрастающих в Нижегородской области, по физиологическим характеристикам, связанным с содержанием крахмала в тканях их побегов, имеет наследственную обусловленность.

Ключевые слова: тополь, ткани побега, гистохимия, крахмал, двухфакторный дисперсионный анализ, видоспецифичность

Ссылка для цитирования: Бессчетнов В.П., Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов П.В. Наследственная обусловленность видоспецифичности тополей по содержанию крахмала в тканях побегов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 1. С. 22–31. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-22-31

Широкое распространение и многообразие форм хозяйственного использования тополей (*Populus* L.) обусловили их продолжительные и разносторонние исследования у нас в стране [1–3] и за ее пределами [4–11]. На современном этапе это такие прогрессивные направления биологической науки как: биорегуляция растительного организма [12, 13], биотехнологии [14–16], геномика [7, 17, 18], геновая модификация древесных пород [19–22]. Сохраняют свои позиции работы по физиологии тополей [9, 23], однако отечественных публикаций на эту тему не много.

Успешность распространения рассматриваемого рода практически на всех континентах [4, 5, 8], высокая эффективность их хозяйственного использования [1, 3, 7, 11, 19, 24–26] во многом детерминированы его биологическими особенностями, полиморфизмом и выраженной экологической пластичностью. Последняя отражается в широком диапазоне многочисленных физиологических реакций, обеспечивая резистентность к лимитирующим факторам и надежную адаптацию к локальным условиям мест обитания [6, 10, 27–30]. Классические представления о систематическом устройстве рода тополь базируются на его многочисленных морфологических признаках [1–5]. Попыток рассмотреть данный вопрос с

позиций физиологической видоспецифичности и степени наследственной обусловленности ее фенотипических проявлений пока еще мало [9, 12, 17, 31].

Цель работы

Цель работы — установление наследственной обусловленности видоспецифичности тополей по содержанию крахмала в тканях их побегов.

Материалы и методы

При проведении исследований были учтены основные требования к организации опыта: его типичность, пригодность, целесообразность и надежность, соблюдение принципа единственного логического различия и рендомизированного выбора объектов. Дифференцирующее влияние хронографических и экологических факторов нивелировалось одновременным отбором и однотипностью биологических проб у всех учетных растений, введением в схему опыта только одновозрастных деревьев, произрастающих в одинаковых почвенно-климатических условиях и находящихся в одинаковом фенологическом состоянии. Нормально развитые однолетние побеги для гистохимического анализа отбирались в периферии хорошо освещенного участка среднего

пояса кроны. Методическая схема обеспечила решение поставленных статистических задач с помощью однофакторного и двухфакторного дисперсионного анализа [32–36].

В качестве объекта исследований выбраны восемь видов из трех секций рода тополь (*Populus* L.). Им присвоены метки: вид 1 — тополь белый пирамидальный (*P. alba* L., *f. pyramidalis*); вид 2 — тополь черный, или осокорь (*P. nigra* L.); вид 3 — тополь черный пирамидальный, или итальянский (*P. nigra*, *var. italica* Münchh.); вид 4 — тополь Симони (*P. Simonii* Carr.); вид 5 — тополь бальзамический (*P. balsamifera* L.); вид 6 — тополь лавролистный (*P. laurifolia* Ledeb.); вид 7 — тополь белый (*P. alba* L.); вид 8 — осина (*P. tremula* L.). Они представляли следующие таксономические подразделения рода: секция черные или дельтовидные тополя (*Aigeiros*): тополь черный (вид 2), тополь итальянский (вид 3); секция настоящие или белые тополя (*Populus*): тополь белый пирамидальный (вид 1), тополь белый типичная форма (вид 7), осина (вид 8); секция бальзамические тополя (*Tacamahaca*): тополь китайский (вид 4), тополь бальзамический (вид 5), тополь лавролистный (вид 6). Каждый вид в опыте представлен 10 учетными деревьями, которые по визуальной оценке их санитарного состояния относились к первой категории (здоровые, без признаков ослабления). Согласно лесорастительному районированию, место их дислокации расположено в зоне хвойно-широколиственных лесов (третья лесорастительная зона) и входит в район хвойно-широколиственных (смешанных) лесов европейской части Российской Федерации.

Гистохимический анализ проведен с учетом существующих представлений о его эффективности в исследованиях древесных видов [37, 38], в том числе тополей [31, 39, 40]. Использованы методические разработки кафедры лесных культур Нижегородской ГСХА [41–45], согласно которым, для приготовления временных препаратов брали поперечные срезы из центральной части побега и анализировали с помощью микроскопа. Крахмал выявляли, применяя раствор Люголя, его содержание оценивали в баллах по предложенной нами 6-бальной (0–5) шкале [41–45].

Результаты и обсуждение

Оценка содержания крахмала в тканях побегов тополей показала значительные различия между исследуемыми видами (табл. 1–5). По наличию крахмала в сердцевине побега отчетливо видно отсутствие сходства между представителями разных секций (см. табл. 1).

Тополь бальзамический (вид 5) содержал крахмал в сердцевине в большем количестве, чем другие виды. Достаточно большое содержание

Т а б л и ц а 1

Содержание крахмала в сердцевине побега Starch content in the core of the shoot

Вид	Среднее, баллы	Максимум, баллы	Минимум, баллы	Ошибка, ± баллы	Коэффициент вариации, %	Точность опыта, %
1	0,56	1,50	0,00	0,04	60,24	7,20
2	1,27	2,00	0,50	0,05	32,62	3,90
3	0,42	1,00	0,00	0,03	59,36	7,09
4	1,37	2,00	0,50	0,04	25,00	2,99
5	1,84	3,00	1,00	0,05	23,80	2,84
6	0,64	1,00	0,00	0,04	40,33	6,82
7	0,49	1,00	0,00	0,06	68,31	11,55
8	0,91	1,50	0,50	0,04	37,27	4,46
Общее	0,99	3,00	0,00	0,03	60,15	2,72

Т а б л и ц а 2

Содержание крахмала в сердцевинных лучах ксилемы Starch content in xylem wood rays

Вид	Среднее, баллы	Максимум, баллы	Минимум, баллы	Ошибка, ± баллы	Коэффициент вариации, %	Точность опыта, %
1	0,81	2,00	0,00	0,06	59,93	7,16
2	2,16	3,00	1,50	0,04	16,25	1,94
3	1,75	2,50	1,00	0,05	24,20	2,89
4	1,84	3,00	1,00	0,06	25,41	3,04
5	2,02	3,00	1,00	0,05	19,50	2,33
6	1,34	2,00	1,00	0,06	26,75	4,52
7	0,93	1,50	0,50	0,06	39,49	6,67
8	1,22	2,50	0,50	0,05	36,48	4,36
Общее	1,56	3,00	0,00	0,03	40,56	1,83

крахмала определено у тополя Симони (вид 4) из той же секции. Белые тополя (виды 1, 7, 8) в сердцевине содержали крахмала намного меньше. Представитель секции черных тополей (вид 3) показал наименьшее содержание крахмала.

В живых клетках сердцевинных лучей ксилемы у рассматриваемых видов содержание крахмала также неодинаково (см. табл. 2).

Вместе с тем, в сердцевинных лучах ксилемы отчетливо наблюдается сходное с предыдущим соотношение в содержании крахмала у тех же видов.

Содержание крахмала в так называемых внешних тканях побегов столь же видоспецифично, при том, что в срединной зоне флоэмы в целом, крахмал содержался в наибольшем количестве (см. табл. 3).

Т а б л и ц а 3
Содержание крахмала в срединной
зоне флоэмы

Starch content in the middle zone of the phloem

Вид	Среднее, баллы	Максимум, баллы	Минимум, баллы	Ошибка, ± баллы	Коэффициент вариации, %	Точность опыта, %
1	2,57	3,50	2,00	0,05	17,29	2,07
2	2,03	2,50	1,50	0,04	17,24	2,06
3	2,29	3,00	1,50	0,04	13,72	1,64
4	2,04	2,50	1,50	0,03	13,91	1,66
5	1,23	2,00	1,00	0,03	23,69	2,83
6	1,41	2,00	1,00	0,06	26,41	4,46
7	2,43	4,00	2,00	0,09	21,85	3,69
8	2,59	4,00	2,00	0,06	20,11	2,40
Общее	2,09	4,00	1,00	0,03	29,19	1,32

Т а б л и ц а 4
Суммарное содержание крахмала
в тканях побега

Total starch content in shoot tissues

Вид	Среднее, баллы	Максимум, баллы	Минимум, баллы	Ошибка, ± баллы	Коэффициент вариации, %	Точность опыта, %
1	7,37	10,50	4,00	0,13	14,46	1,73
2	11,02	13,50	8,50	0,15	11,30	1,35
3	9,15	11,50	6,50	0,12	11,25	1,35
4	10,42	12,50	7,00	0,13	10,76	1,29
5	11,21	14,00	8,50	0,15	10,89	1,30
6	10,47	13,50	8,50	0,18	10,22	1,73
7	7,79	10,00	5,50	0,17	12,87	2,18
8	9,13	11,50	5,50	0,13	11,84	1,42
Общее	9,63	14,00	4,00	0,08	18,00	0,81

Содержание крахмала в сумме во всех учетных зонах и тканях побега соответствует представленным выше оценкам физиологического состояния исследуемых растений (см. табл. 4).

Виды из секции белых тополей (виды 1, 7), имея близкие по значению показатели общего содержания крахмала, отличались по этому признаку от представителей секций черных и бальзамических тополей. Тополь бальзамический (вид 5) и тополь черный, или осокорь, (вид 2) отличаются максимальным средним его содержанием.

Статистически полученные данные вполне достоверны, в большинстве случаев погрешность не превысила 5-процентный порог. В отдельных вариантах погрешность была несколько выше, что объясняется наличием в массивах исходных

данных нулевых значений, которые соответствуют полному отсутствию крахмала в тестируемой ткани или учетной зоне: они существенно повышают оценки дисперсии.

Дисперсионный анализ, выполненный по однофакторной схеме, уверенно опровергает нулевую гипотезу о том, что все сравниваемые группы растений (в нашем случае все участвующие в опыте деревья тополей) относятся к одной генеральной совокупности, и видовых различий между ними не существует (табл. 5). Расчетные величины F-критерия принципиально больше своих допустимых табличных пределов на принятых в работе уровнях значимости.

Это справедливо в отношении всех учетных зон исследуемых тканей побегов. В частности, по содержанию крахмала в сердцевине однолетних побегов (зона 1) опытное значение критерия Фишера составило 138,36 при его табличных величинах на пяти- и однопроцентном уровнях значимости 2,03 и 2,69. По содержанию этого полисахарида в срединной зоне флоэмы (зона 5) и того больше — 175,43 при тех же критических значениях. В большинстве остальных зон учета эти показатели указанного физиологического параметра были вполне сопоставимы. Данное обстоятельство позволило продолжить дисперсионный анализ и вычислить оценки доли влияния организованных факторов — различий между собственно видами тополей, что рассматривается как эффект влияния наследственно обусловленной дисперсии.

Наибольший эффект влияния генотипов на формирование фенотипических различий между представителями сравниваемых видов тополей при выполнении расчетов по алгоритму Плохинского зафиксирован по содержанию крахмала в прикамбиальной зоне флоэмы (зона 4): $71,81 \pm 0,41$ %. Сопоставимы аналогичные оценки по содержанию крахмала в сердцевине (зона 1): $66,77 \pm 0,48$ % и по его суммарному количеству во всех учетных зонах и тканях (зона 8): $60,44 \pm 0,57$ %. В меньшей степени такое влияние отмечено по содержанию крахмала в неопробковевших клетках живой части грубой коры (зона 7): $28,24 \pm 1,04$ %. Это свидетельствует о том, что в ней различия между видами были минимальными.

При вычислении доли влияния фактора по алгоритму Снедекора в целом был получен аналогичный результат, хотя оценки оказались несколько выше, чем показатели, рассчитанные по первому алгоритму — Плохинского. Так, по содержанию крахмала в прикамбиальной зоне флоэмы (зона 4) достигнуто максимальное значение: $74,18 \pm 0,37$ %. Аналогично, по содержанию этого полисахарида в срединной зоне флоэмы (зона 5) установлено $62,37 \pm 0,55$ %.

Т а б л и ц а 5

**Существенность различий между представителями рода тополь
по содержанию крахмала в тканях побегов**

Significance of differences between representatives of the genus poplar in starch content in shoot tissues

Зоны учета	Критерий Фишера ($F_{оп}$)	Доля влияния фактора ($h^2 \pm s_h^2$)						Критерии различий	
		по Плохинскому			по Снедекору				
		h^2	$\pm s_h^2$	F_h^2	h^2	$\pm s_h^2$	F_h^2	НСР	D
1	138,36	0,6677	0,0048	138,36	0,6935	0,0045	155,79	0,123	0,213
2	90,10	0,5668	0,0063	90,10	0,5947	0,0059	101,05	0,149	0,259
3	88,05	0,5612	0,0064	88,05	0,5891	0,0060	98,73	0,112	0,193
4	175,43	0,7181	0,0041	175,43	0,7418	0,0037	197,82	0,106	0,183
5	101,65	0,5962	0,0059	101,65	0,6237	0,0055	114,15	0,139	0,241
6	41,84	0,3779	0,0090	41,84	0,4021	0,0087	46,31	0,144	0,250
7	27,04	0,2824	0,0104	27,04	0,3006	0,0102	29,53	0,176	0,304
8	105,21	0,6044	0,0057	105,21	0,6319	0,0053	118,19	0,391	0,676

Примечание. Зоны учета: 1 — сердцевина; 2 — сердцевинные лучи ксилемы; 3 — перимедулярная зона ксилемы; 4 — прикамбиальная зона флоэмы; 5 — срединная зона флоэмы; 6 — феллоген и прифеллогенная зона флоэмы; 7 — живые клетки грубой коры; 8 — суммарное содержание крахмала; $F_{оп}$ — опытное значение критерия Фишера; h^2 — доля влияния организованного фактора; $\pm s_h^2$ — ошибка доли влияния организованного фактора; НСР — наименьшая существенная разность; D — критерий Тьюки.

Т а б л и ц а 6

**Двухфакторный иерархический дисперсионный анализ содержания крахмала
в тканях побегов различных видов тополей**

Two-factor hierarchical analysis of variance for starch content in shoot tissues of various poplar species

Зоны учета	Источник дисперсии (фактор)	Критерий Фишера ($F_{оп}$)	Доля влияния фактора ($h^2 \pm s_h^2$)			
			по Плохинскому		по Снедекору	
			h^2	$\pm s_h^2$	h^2	$\pm s_h^2$
1	Виды (A)	341,63	0,6677	0,0055	0,6752	0,0054
	Деревья (B)	0,37	0,0173	0,1451	—	—
	Остаток (Z)	—	0,3150	0,6850	0,3248	0,6752
2	Виды (A)	209,73	0,5668	0,0072	0,5749	0,0071
	Деревья (B)	0,40	0,0239	0,1441	—	—
	Остаток (Z)	—	0,4093	0,5907	0,4251	0,5749
3	Виды (A)	260,62	0,5612	0,0073	0,5661	0,0072
	Деревья (B)	0,31	0,0191	0,1448	—	—
	Остаток (Z)	—	0,4198	0,5802	0,4339	0,5661
4	Виды (A)	583,99	0,7181	0,0047	0,7224	0,0046
	Деревья (B)	0,27	0,0109	0,1460	—	—
	Остаток (Z)	—	0,2710	0,7290	0,2776	0,7224
5	Виды (A)	242,66	0,5962	0,0067	0,6040	0,0066
	Деревья (B)	0,39	0,0218	0,1444	—	—
	Остаток (Z)	—	0,3821	0,6179	0,3960	0,6040
6	Виды (A)	70,44	0,3779	0,0104	0,3879	0,0102
	Деревья (B)	0,56	0,0475	0,1406	—	—
	Остаток (Z)	—	0,5745	0,4255	0,6121	0,3879
7	Виды (A)	95,94	0,2824	0,0120	0,2790	0,0120
	Деревья (B)	0,25	0,0261	0,1441	—	—
	Остаток (Z)	—	0,6915	0,3085	0,7210	0,2790
8	Виды (A)	314,11	0,6044	0,0066	0,6096	0,0065
	Деревья (B)	0,30	0,0170	0,1451	—	—
	Остаток (Z)	—	0,3785	0,6215	0,3904	0,6096

Полученные данные соответствуют представлениям о выраженной наследственной обусловленности видоспецифичности тополей в физиологическом отношении.

Критерии существенности различий (НСР и D) определили: различия между какими именно видами тополей и, по какой из анализируемых зон учета могут быть отнесены к категории существенных (см. табл. 1–4). По всем исследованным признакам (зонам учета) физиологического состояния представителей разных секций и видов тополей, связанным с наличием в клетках тканей их побегов крахмала, попарное сопоставление значений показало различия, превышающие величину НСР на 5%-м уровне значимости. Как правило, эти различия были выше и порогового значения D -критерия Тьюки. Например, тополь черный, или осокорь, (вид 2) не имел существенных различий по содержанию крахмала в сердцевине побегов только с тополем черным пирамидальным (вид 3), что обнаружилось и по НСР, и по D -критерию Тьюки.

Проведение дисперсионного анализа по двухфакторной иерархической схеме позволило детально рассмотреть характер влияния организованных факторов на видимые различия между сравниваемыми видами тополей (табл. 6).

По данным табл. 6, видно наличие существенных различий между собственно видами тополей, включенными в схему опыта. На это указывают величины расчетных критериев Фишера по фактору A , во много раз превосходящие соответствующие табличные значения для установленного числа степеней свободы на 5%-м и на 1%-м уровне значимости ($F_{05/01} = 2,14/2,91$). Это дает основание признать достаточно высокую наследственную обусловленность отмеченных фенотипических различий.

Влияние фактора высшей иерархии (фактор A или различия между видами) по всем тестируемым признакам оказалось весьма весомым при его расчете как по алгоритму Плохинского, так и по алгоритму Снедекора (см. табл. 6), что вполне соответствует результатам однофакторного дисперсионного анализа (см. табл. 5). В расчетах по алгоритму Плохинского наибольшие значения доли влияния организованных факторов зафиксированы по содержанию крахмала: в прикамбиальной зоне флоэмы (зона 4): $71,81 \pm 0,47$ %; в сердцевине (зона 1): $66,77 \pm 0,55$ %; в срединной зоне флоэмы (зона 5): $59,62 \pm 0,67$ %; по сумме оценок по всем учетным зонам и тканям (зона 8): $60,44 \pm 0,66$ %. В этом варианте расчетов наименьшее значение доли влияния организованных факторов зафиксировано по содержанию крахмала в корковой зоне (зона 7): $28,24 \pm 1,20$ %. Результаты расчета величин силы влияния межвидовых различий (организованного фактора A) по алгоритму Снедекора оказались вполне сопоставимы.

Различия между учетными деревьями одного вида (фактор B) не достигли уровня существенных, что обнаружено с помощью F -критерия Фишера (см. табл. 6): ни в одном из случаев он не превысил минимально допустимое табличное значение как на 5%-м, так и тем более на 1%-м уровне значимости ($F_{05/01} = 1,37/1,57$). Если использование алгоритма Плохинского дает возможность вычислить значение таких недостоверных различий, то алгоритм Снедекора не позволяет этого сделать. В соответствии с последним обстоятельством в табл. 6 в ячейках, предназначенных для записи таких значений, приведены прочерки.

Так называемые случайные различия или остаточная дисперсия (фактор Z), которые в нашем случае рассматриваются как различия, вызванные влиянием комплекса не учитываемых в опыте, или неорганизованных, факторов (в частности, факторов среды), не связанных со спецификой биологии вида и не относящихся к различиям между учетными деревьями, принимают значения от 27,10 % в сердцевине (зона 1) до 69,15% в живых клетках грубой коры (зона 7). Их можно рассматривать как различия в пределах одной особи и связывать с индивидуальной паратипической изменчивостью.

Установлена видоспецифичность представителей секций белых, черных и бальзамических тополей, произрастающих на территории Нижегородской обл., по содержанию крахмала в разных тканях их побегов. Его количество в них неодинаково. Более насыщены им ткани, в которых сосредоточено максимальное количество живых клеток, в частности флоэма. При этом что изменчивость признаков тополей, имеющих хозяйственное, адаптационное и идентификационное значение, традиционно рассматривается в контексте их многочисленных морфологических признаков [1–5, 24–26], нами получены новые сведения по данному вопросу в контексте физиологических характеристик рассматриваемых видов.

По данным однофакторного и двухфакторного дисперсионного анализа установлено, что различия между представителями исследуемых секций и видов тополей носят преимущественно наследственный характер по всем вышеуказанным зонам учета их физиологического состояния. При этом степень проявлений зафиксированных различий неодинакова: по одним признакам (зонам учета) между конкретной парой сравниваемых видов различия могли быть признаны существенными, а по другим — нет.

Выводы

1. Видоспецифичность тополей, произрастающих в Нижегородской области, по широкому спектру физиологических характеристик, связан-

ных с содержанием крахмала в тканях их побегов, имеет наследственную обусловленность. Эти признаки во многом определяют соответствие биологии представителей наиболее распространенных на территории России секций тополей почвенно-климатическим условиям мест произрастания. Влияние генотипа на формирование фенотипических различий между представителями сравниваемых видов по разным признакам (зонам учета) неодинаково, и по содержанию крахмала в прикамбиальной зоне флоэмы его доля достигала $71,81 \pm 0,41 \%$.

2. Физиологический статус видов из одной секции характеризуется большим сходством, чем проявления тех же показателей у представителей различных секций тополей.

Список литературы

- [1] Бессчетнов П.П. Тополь (Культура и селекция). Алма-Ата: Кайнар, 1969. 155 с.
- [2] Бессчетнов П.П. Роль интрогрессивной гибридизации в образовании новых видов тополей // Труды Института экологии растений и животных (Уральский научный центр АН СССР). Вып. 91: Закономерности внутривидовой изменчивости листовых пород древесных пород. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1975. С. 3–8.
- [3] Царев А.П. Сортоведение тополя. Воронеж: Изд-во Воронежского университета, 1985. 152 с.
- [4] Schneider C.K. *Populus* // *Plantae Wilsonianae* (Editor – Charles Sprague Sargent), 1916, v. 3, no. 1, pp. 16–39.
- [5] Rehder A. *Manual of Cultivated Trees and Shrubs*. New York: The Macmillan Company, 1949, 996 p.
- [6] Wiese A.H., Zalesny J.A., Donner D.M., Zalesny R.S. Bud Removal Affects Shoot, Root, and Callus Development of Hardwood *Populus* Cuttings // *Silvae Genetica*, 2006, v. 55, iss. 3, pp. 141–148. DOI: 10.1515/sg-2006-0020
- [7] Cooke J.E.K., Rood S.B. Trees of the people: the growing science of poplars in Canada and worldwide // *Canadian J. of Botany*, 2007, v. 85, pp. 1103–1110. DOI: 10.1139/B07-125
- [8] Slavov G., Zhelev P. Salient Biological Features, Systematics, and Genetic Variation of *Populus* // Part of the Plant Genetics and Genomics: Crops and Models, book series. Vol. 8: Series Editors: Stefan Jansson, Rishikesh Bhalerao, Andrew Groover. Springer New York Dordrecht Heidelberg London, 2010, pp. 15–38. DOI: 10.1007/978-1-4419-1541-2_2
- [9] Guo X-Y., Huang Zh-Y., Xu A-Ch., Zhang X.-Sh. A comparison of physiological, morphological and growth responses of 13 hybrid poplar clones to flooding // *Forestry* (London), 2011, v. 84, iss. 1, pp. 1–12. DOI: 10.1093/forestry/cpq037
- [10] Mofidabadi A.J., Ghmeri-Zareh A., Salari A. Five Years Performance of New Introduced Salt Tolerant Hybrid clones (Mofid and P. × *albaeuphratica*) In Iran (West Azar-Bayjan) // *Silvae Genetica*, 2015, v. 64, iss. 3, pp. 117–120. DOI: 10.1515/sg-2015-0011
- [11] Grenke J.S.J., Macdonald S.E. Thomas B.R., Moore C.A., Bork E.W. Relationships between understory vegetation and hybrid poplar growth and size in an operational plantation // *The Forestry Chronicle*, 2016, v. 92, no. 04, pp. 469–476. DOI: 10.5558/tfc2016-083
- [12] Cline M.G., K. Dong-II. A Preliminary Investigation of the Role of Auxin and Cytokinin in Syllaptic Branching of Three Hybrid Poplar Clones Exhibiting Contrasting Degrees of Syllaptic Branching // *Annals of Botany*, 2002, v. 90, iss. 3, pp. 417–421 DOI: 10.1093/aob/mcf1
- [13] Milla-Moreno E.A., McKown A.D., Guy R.D., Soolanayakanahally R.Y. Leaf mass per area predicts palisade structural properties linked to mesophyll conductance in balsam poplar (*Populus balsamifera* L.) // *Botany*, 2016, v. 94, iss. 3, pp. 225–239. DOI: 10.1139/cjb-2015-0219
- [14] Машкина О.С., Шабанова Е.А., Вариводина И.Н., Гродецкая Т.А. Полевые испытания размноженных in vitro клонов осины (*Populus tremula* L.): рост, продуктивность, качество древесины, генетическая стабильность // ИВУЗ. Лесной журнал, 2019. № 6. С. 25–38. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.6.25
- [15] Bueno M.A., Astorga R., Manzanera J.A. Plant regeneration of *Populus alba* «Siberia extremeña» from ament // *Forest Systems*, 1992, v. 1, iss. 2, pp. 163–171. DOI: 10.5424/491
- [16] Kellison R. Forest biotechnology: more than wood production // *Forests and Genetically Modified Trees*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2010, I1699E/1/08.10, pp. 217–226. Available at: <http://www.fao.org/docrep/013/i1699e/i1699e.pdf> (accessed 12.08.2020).
- [17] Brundu G., Lupi R., Zapelli I., Fossati T., Patrignani G., Camarda I., Sala F., Castiglione S. The Origin of Clonal Diversity and Structure of *Populus alba* in Sardinia: Evidence from Nuclear and Plastid Microsatellite Markers // *Annals of Botany*, 2008, v. 102, iss. 6, pp. 997–1006. DOI: 10.1093/AOB/MCN107
- [18] Jansson S., Bhalerao R., Groover A. Genetics and Genomics of *Populus* // Part of the Plant Genetics and Genomics: Crops and Models, book series. Vol. 8: Series Editor Richard A. Jorgensen. Springer: New York, Dordrecht, Heidelberg, London, 2010, 388 p. DOI: 10.1007/978-1-4419-1541-2_1
- [19] Sixto H., Hernandez M.J., Barrio M., Carrasco J., Cañellas I. *Populus* genus for the biomass production for energy use: a review // *Forest Systems*, 2007, v. 16, no. 3, pp. 277–294. DOI: 10.5424/srf/2007163-01016
- [20] Yao W., Wang S., Zhou B., Jiang T. Transgenic poplar overexpressing the endogenous transcription factor ERF76 gene improves salinity tolerance // *Tree Physiology*, 2016, v. 36, iss. 7, pp. 896–908. DOI: 10.1093/treephys/tpw004
- [21] McDonnell L.M., Coleman H.D., French D.G., Meilan R., Mansfield S.D. Engineering trees with target traits // *Forests and genetically modified trees*. – Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2010, I1699E/1/08.10, pp. 77–122. Available at: <http://www.fao.org/docrep/013/i1699e/i1699e.pdf> (accessed 12.08.2020).
- [22] Fladung M., Pasonen H.-L., Walter C. Genetically modified trees and associated environmental concerns // *Forests and genetically modified trees*. – Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2010, I1699E/1/08.10, pp. 177–201. Available at: <http://www.fao.org/docrep/013/i1699e/i1699e.pdf> (accessed 12.08.2020).
- [23] Gornall J.L., Guy R.D. Geographic variation in ecophysiological traits of black cottonwood (*Populus trichocarpa*) // *Canadian J. of Botany*, 2007, v. 85, no. 12, pp. 1202–1213. DOI: 10.1139/B07-079
- [24] Бессчетнов П.В. Морфометрические характеристики листьев тополей в условиях городских посадок Нижнего Новгорода // *Вестник Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии*, 2018. № 4 (20). С. 17–27.
- [25] Бессчетнов П.В., Бессчетнова Н.Н. Корреляция параметров листового аппарата тополей в условиях городских посадок // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*, 2018. № 1 (48). С. 5–10.

- [26] Бессчетнов П.В., Бессчетнова Н.Н. Тополь белый (*Populus alba* L.) в объектах озеленения Нижегородской области: корреляция и регрессия параметров листового аппарата // Вестник Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии, 2019. № 2 (22). С. 25–31.
- [27] Турчин Т.Я., Ермолова А.С. Биологическая устойчивость насаждений тополя белого в степном Придонье // Вестник Алтайского государственного аграрного университета, 2014. № 8 (118). С. 59–64.
- [28] Ермолова А.С. Рост, состояние и устойчивость насаждений тополя белого в поймах рек степного Придонья // Лесохозяйственная информация, 2015. № 4. С. 6–16.
- [29] Cheliak W.M., Dancik B.P. Genic diversity of natural populations of a clone-forming tree *Populus tremuloides* // Canadian J. of Genetics and Cytology, 1982, v. 24, iss. 5, pp. 611–616. DOI: 10.1139/g82-065
- [30] Ingvarson P.K. Nucleotide Polymorphism, Linkage Disequilibrium and Complex Trait Dissection in *Populus* // Part of the Plant Genetics and Genomics: Crops and Models, book series. Vol. 8: Series Editors: Stefan Jansson, Rishikesh Bhalerao, Andrew Groover. Springer New York Dordrecht Heidelberg London, 2010, pp. 91–111. DOI: 10.1007/978-1-4419-1541-2_5
- [31] Corcuera L., Maestro C., Notivol E. Ecophysiology as a tool for selecting more adapted and productive clones, in a clonal silvicultural frame of poplars // Forest Systems, 2005, v. 14, no. 3, pp. 394–407. DOI: 10.5424/srf/2005143-00933
- [32] Hinkelmann K., Kempthorne O. Design and Analysis of Experiments, Volume 1: Introduction to Experimental. 2nd edition. Hoboken, New Jersey (Printed in the USA): Wiley-Interscience, Wiley Series in Probability and Statistics, 2008, 631 p.
- [33] Mason R.L., Gunst R.F., Hess J.L. Statistical Design and Analysis of Experiments: With Applications to Engineering and Science. 2nd. edition. Hoboken, New Jersey (Printed in the USA): Wiley-Interscience, Wiley Series in Probability and Statistics, 2003, 752 p.
- [34] Mead R., Curnow N., Hasted A.M. Statistical Methods in Agriculture and Experimental Biology. 3rd ed. New York: Chapman and Hall/CRC, 2003, 488 p.
- [35] Srinagesh K. The Principles of Experimental Research. Waltham, Massachusetts (United States): Butterworth-Heinemann, 2005, 432 p.
- [36] Zar J.H. Biostatistical Analysis: Fifth Edition. Edinburg Gate: Pearson New International edition — Pearson Education Limited, 2014, 756 p.
- [37] Kramer P.J. The role of physiology in forestry // The Forestry Chronicle, 1956, v. 32, iss. 3, pp. 297–308. DOI: <http://dx.doi.org/10.5558/tfc32297-3>
- [38] Kshatriya K., Whitehill J., Madilao L., Henderson H., Kermod A., Kolotelo D., Bohlmann J. Histology of resin vesicles and oleoresin terpene composition of conifer seeds // Canadian J. of Forest Research, 2018, v. 48, no. 9, pp. 1073–1084. DOI: 10.1139/cjfr-2018-0164
- [39] Бессчетнов П.В., Бессчетнова Н.Н. Специфика содержания крахмала в тканях побегов разных видов тополей // Вестник Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии, 2020. № 2 (26). С. 23–34.
- [40] Marron N., Brignolas F., Delmotte F.M., Dreyer E. Modulation of leaf physiology by age and in response to abiotic constraints in young cuttings of two *Populus deltoides* × *P. nigra* genotypes // Annals of Forest Science, 2008, v. 65, no. 4, art. no. 404, 8 p. DOI: 10.1051/forest:2008016
- [41] Бессчетнова Н.Н. Сравнительная оценка плюсовых деревьев сосны обыкновенной по содержанию крахмала в побегах // Вестник Марийского государственного технического университета. Сер. Лес. Экология. Природопользование, 2010. № 2 (9). С. 49–55.
- [42] Бессчетнова Н.Н. Генотипическая неидентичность плюсовых деревьев сосны обыкновенной по содержанию крахмала // Известия Оренбургского аграрного университета, 2013. № 4 (42). С. 20–23.
- [43] Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П., Кулькова А.В., Мишукова И.В. Содержание крахмала в тканях побегов разных видов ели (*Picea A. Dietr.*) в условиях интродукции // ИВУЗ. Лесной журнал, 2017. № 4. С. 57–68. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.4.57
- [44] Бессчетнова Н.Н., Кулькова А.В. Содержание запасных питательных веществ в клетках тканей годичных побегов представителей рода ель (*Picea* L.) в условиях Нижегородской области // ИВУЗ. Лесной журнал, 2019. № 6. С. 52–61. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.6.52
- [45] Кулькова А.В., Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П. Многопараметрический анализ в оценке видоспецифичности представителей рода ель (*Picea*) // ИВУЗ. Лесной журнал, 2018. № 6. С. 23–38. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.6.23

Сведения об авторах

Бессчетнов Владимир Петрович — д-р биол. наук, профессор, зав. кафедрой лесных культур Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии, lesfak@mail.ru

Бессчетнова Наталья Николаевна — д-р с.-х. наук, доцент, декан факультета лесного хозяйства Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии, besschetnova1966@mail.ru

Бессчетнов Петр Владимирович — аспирант кафедры лесных культур Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии, selhoz nauka@mail.ru

Поступила в редакцию 24.08.2020.

Принята к публикации 30.11.2020.

GENETIC DEPENDENCE OF POPLAR SPECIES SPECIFICITY ON STARCH CONTENT IN SHOOTS TISSUES

V.P. Besschetnov, N.N. Besschetnova, P.V. Besschetnov

Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, 97, Gagarin av., 603107, Nizhny Novgorod, Russia

lesfak@mail.ru

We studied the hereditary conditionality of species specificity of 8 poplar species by the starch content in the tissues of their shoots. The objects of research were: white pyramidal poplar: (*P. alba* L., f. *pyramidalis*); black poplar (*P. nigra* L.); Italic poplar (*P. nigra*, var. *italica* Münchh.); Chinese poplar (*P. Simonii* Carr.); balsamic poplar (*P. balsamifera* L.); poplar larry (*P. laurifolia* Ledeb.); white poplar (*P. alba* L.); aspen (*P. tremula* L.). Starch concentration in various tissues of annual shoots were established during microscopic studies with histochemical staining of preparations. Statistical processing of the actual material was performed using one-way and two-way anova. It was found that the types of poplars differed in the presence of starch in different tissues. The white pyramidal poplar and its typical shape showed similarities in its content. Aspen differed from them in a somewhat large amount of this substance. The species included in one section were more similar to each other, with a noticeable difference from the representatives of other sections. The difference in ratings between sections of black and balsamic poplars is less noticeable than between each of these sections and white poplars. The influence of the genotype on the formation of physiological differences reaches 72 %. Differences between accounting trees of the same species are less pronounced than between the taxonomic groups compared, and do not reach the level of significant ones. The species specificity of poplars growing in the Nizhny Novgorod region, according to the physiological characteristics associated with the starch content in the tissues of their shoots, is hereditary.

Keywords: poplar, shoot tissues, histochemistry, starch, two-way dispersion analysis, species specificity

Suggested citation: Besschetnov V.P., Besschetnova N.N., Besschetnov P.V. *Nasledstvennaya obuslovlennost' vidospetsifichnosti topoley po sodержaniyu krakhmala v tkanyakh pobegov* [Genetic dependence of poplar species specificity on starch content in shoots tissues]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 1, pp. 22–31.

DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-22-31

References

- [1] Besschetnov P.P. *Topol' (Kul'tura i selektsiya)* [Poplar (The culture and selection)]. Alma-Ata: Kainar, 1969, 155 p.
- [2] Besschetnov P.P. *Rol' introgressivnoy gibrizatsii v obrazovanii novykh vidov topoley* [The role of introgressive hybridization in the formation of new poplar species]. *Trudy Instituta ekologii rasteniy i zhivotnykh (Ural'skiy nauchnyy tsentr AN SSSR)*. Vyp. 91: Zakonomernosti vnutrividovoy izmenchivosti listvennykh drevesnykh porod [Proceedings of the Institute of plant and animal ecology (Ural scientific center of the USSR Academy of Sciences)]. Is. 91: Regularities of intraspecific variability of deciduous tree species]. Sverdlovsk: UNC AN SSSR, 1975, pp. 3–8.
- [3] Tsarev A.P. *Sortovedenie topolya* [The varieties of poplars]. Voronezh: Izd-vo Voronezhskogo universiteta [Voronezh University Publishing House], 1985, 152 p.
- [4] Schneider C.K. *Populus*. *Plantae Wilsonianae* (Editor – Charles Sprague Sargent), 1916, v. 3, no. 1, pp. 16–39.
- [5] Rehder A. *Manual of Cultivated Trees and Shrubs*. New York: The Macmillan Company, 1949, 996 p.
- [6] Wiese A.H., Zalesny J.A., Donner D.M., Zalesny R.S. Bud Removal Affects Shoot, Root, and Callus Development of Hardwood *Populus* Cuttings. *Silvae Genetica*, 2006, v. 55, iss. 3, pp. 141–148. DOI: 10.1515/sg-2006-0020
- [7] Cooke J.E.K., Rood S.B. Trees of the people: the growing science of poplars in Canada and worldwide. *Canadian J. of Botany*, 2007, v. 85, pp. 1103–1110. DOI: 10.1139/B07-125
- [8] Slavov G., Zhelev P. Salient Biological Features, Systematics, and Genetic Variation of *Populus*. Part of the Plant Genetics and Genomics: Crops and Models, book series. Vol. 8: Series Editors: Stefan Jansson, Rishikesh Bhalariao, Andrew Groover. Springer New York Dordrecht Heidelberg London, 2010, pp. 15–38. DOI: 10.1007/978-1-4419-1541-2_2
- [9] Guo X-Y., Huang Zh-Y., Xu A-Ch., Zhang X.-Sh. A comparison of physiological, morphological and growth responses of 13 hybrid poplar clones to flooding. *Forestry (London)*, 2011, v. 84, iss. 1, pp. 1–12. DOI: 10.1093/forestry/cpq037
- [10] Mofidabadi A.J., Ghmeri-Zareh A., Salari A. Five Years Performance of New Introduced Salt Tolerant Hybrid clones (Mofid and P. × albaeuphratica) In Iran (West Azar-Bayjan). *Silvae Genetica*, 2015, v. 64, iss. 3, pp. 117–120. DOI: 10.1515/sg-2015-0011
- [11] Grenke J.S.J., Macdonald S.E., Thomas B.R., Moore C.A., Bork E.W. Relationships between understory vegetation and hybrid poplar growth and size in an operational plantation. *The Forestry Chronicle*, 2016, v. 92, no. 04, pp. 469–476. DOI: 10.5558/tfc2016-083
- [12] Cline M.G., K. Dong-II. A Preliminary Investigation of the Role of Auxin and Cytokinin in Sylleptic Branching of Three Hybrid Poplar Clones Exhibiting Contrasting Degrees of Sylleptic Branching. *Annals of Botany*, 2002, v. 90, iss. 3, pp. 417–421. DOI: 10.1093/aob/mcf1
- [13] Milla-Moreno E.A., McKown A.D., Guy R.D., Soolanayakanahally R.Y. Leaf mass per area predicts palisade structural properties linked to mesophyll conductance in balsam poplar (*Populus balsamifera* L.). *Botany*, 2016, v. 94, iss. 3, pp. 225–239. DOI: 10.1139/cjb-2015-0219
- [14] Mashkina O.S., Shabanova E.A., Varivodina I.N., Grodetzkaya T.A. *Polevye ispytaniya razmnozhenykh in vitro klonov osiny (Populus tremula L.): rost, produktivnost', kachestvo drevesiny, geneticheskaya stabil'nost'* [Field tests of in vitro clones of aspen (*Populus tremula* L.): growth, productivity, wood quality, genetic stability]. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*, 2019, no. 6, pp. 25–38. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.6.25
- [15] Bueno M.A., Astorga R., Manzanera J.A. Plant regeneration of *Populus alba* «Siberia extremeña» from ament. *Forest Systems*, 1992, v. 1, iss. 2, pp. 163–171. DOI: 10.5424/491
- [16] Kellison R. *Forest biotechnology: more than wood production. Forests and genetically modified trees*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2010, I1699E/1/08.10, pp. 217–226. Available at: <http://www.fao.org/docrep/013/i1699e/i1699e.pdf> (accessed 12.08.2020).

- [17] Brundu G., Lupi R., Zapelli I., Fossati T., Patrignani G., Camarda I., Sala F., Castiglione S. The Origin of Clonal Diversity and Structure of *Populus alba* in Sardinia: Evidence from Nuclear and Plastid Microsatellite Markers. *Annals of Botany*, 2008, v. 102, iss. 6, pp. 997–1006. DOI: 10.1093/AOB/MCN107
- [18] Jansson S., Bhalerao R., Groover A. Genetics and Genomics of *Populus*. Part of the Plant Genetics and Genomics: Crops and Models, book series. Vol. 8: Series Editor Richard A. Jorgensen. Springer: New York, Dordrecht, Heidelberg, London, 2010, 388 p. DOI: 10.1007/978-1-4419-1541-2_1
- [19] Sixto H., Hernandez M.J., Barrio M., Carrasco J., Cañellas I. *Populus* genus for the biomass production for energy use: a review. *Forest Systems*, 2007, v. 16, no. 3, pp. 277–294. DOI: 10.5424/srf/2007163-01016
- [20] Yao W., Wang S., Zhou B., Jiang T. Transgenic poplar overexpressing the endogenous transcription factor ERF76 gene improves salinity tolerance. *Tree Physiology*, 2016, v. 36, iss. 7, pp. 896–908. DOI: 10.1093/treephys/tpw004
- [21] McDonnell L.M., Coleman H.D., French D.G., Meilan R., Mansfield S.D. Engineering trees with target traits. *Forests and genetically modified trees*. – Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2010, I1699E/1/08.10, pp. 77–122. Available at: <http://www.fao.org/docrep/013/i1699e/i1699e.pdf> (accessed 12.08.2020).
- [22] Fladung M., Pasonen H.-L., Walter C. Genetically modified trees and associated environmental concerns. *Forests and genetically modified trees*. – Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2010, I1699E/1/08.10, pp. 177–201. Available at: <http://www.fao.org/docrep/013/i1699e/i1699e.pdf> (accessed 12.08.2020).
- [23] Gornall J.L., Guy R.D. Geographic variation in ecophysiological traits of black cottonwood (*Populus trichocarpa*). *Canadian J. of Botany*, 2007, v. 85, no. 12, pp. 1202–1213. DOI: 10.1139/B07-079
- [24] Besschetnov P.V. *Morfometricheskie kharakteristiki list'ev topoley v usloviyakh gorodskikh posadok Nizhnego Novgoroda* [Morphometric characteristics of poplar leaves in conditions of urban planting in Nizhny Novgorod]. *Vestnik Nizhegorodskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* [Bulletin of the Nizhny Novgorod State Agricultural Academy], 2018, no. 4 (20), pp. 17–27.
- [25] Besschetnov P.V., Besschetnova N.N. *Korrelyatsiya parametrov listovogo apparata topoley v usloviyakh gorodskikh posadok* [Correlation of parameters of poplar leaf apparatus in urban planting conditions]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Kazan State Agrarian University], 2018, no. 1 (48), pp. 5–10.
- [26] Besschetnov P.V., Besschetnova N.N. *Topol' belyy (Populus alba L.) v ob'ektakh ozeleneniya Nizhegorodskoy oblasti: korrelyatsiya i regressiya parametrov listovogo apparata* [White poplar (*Populus alba* L.) in landscaping objects of the Nizhny Novgorod region: correlation and regression of leaf apparatus parameters]. *Vestnik Nizhegorodskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* [Bulletin of the Nizhny Novgorod State Agricultural Academy], 2019, no. 2 (22), pp. 25–31.
- [27] Turchin T.Ya., Ermolova A.S. *Biologicheskaya ustoychivost' nasazhdeniy topolya belogo v stepnom Pridon'e* [Biological stability of white poplar stands in the steppe Pridonye]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Altai State Agrarian University], 2014, no. 8 (118), pp. 59–64.
- [28] Ermolova A.S. *Rost, sostoyanie i ustoychivost' nasazhdeniy topolya belogo v poymakh rek stepnogo Pridon'ya* [Growth, condition and stability of white poplar stands in floodplains of rivers of the steppe Pridnestrovie]. *Forestry information* [Forestry information], 2015, no. 4, pp. 6–16.
- [29] Cheliak W.M., Dancik B.P. Genic diversity of natural populations of a clone-forming tree *Populus tremuloides*. *Canadian J. of Genetics and Cytology*, 1982, v. 24, iss. 5, pp. 611–616. DOI: 10.1139/g82-065
- [30] Ingvarson P.K. Nucleotide Polymorphism, Linkage Disequilibrium and Complex Trait Dissection in *Populus*. Part of the Plant Genetics and Genomics: Crops and Models, book series. Vol. 8: Series Editors: Stefan Jansson, Rishikesh Bhalerao, Andrew Groover. Springer New York Dordrecht Heidelberg London, 2010, pp. 91–111. DOI: 10.1007/978-1-4419-1541-2_5
- [31] Corcuera L., Maestro C., Notivol E. Ecophysiology as a tool for selecting more adapted and productive clones, in a clonal silvicultural frame of poplars. *Forest Systems*, 2005, v. 14, no. 3, pp. 394–407. DOI: 10.5424/srf/2005143-00933
- [32] Hinkelmann K., Kempthorne O. *Design and Analysis of Experiments, Volume 1: Introduction to Experimental*. 2nd edition. Hoboken, New Jersey (Printed in the USA): Wiley-Interscience, Wiley Series in Probability and Statistics, 2008, 631 p.
- [33] Mason R.L., Gunst R.F., Hess J.L. *Statistical Design and Analysis of Experiments: With Applications to Engineering and Science*. 2nd. edition. Hoboken, New Jersey (Printed in the USA): Wiley-Interscience, Wiley Series in Probability and Statistics, 2003, 752 p.
- [34] Mead R., Curnow N., Hasted A.M. *Statistical Methods in Agriculture and Experimental Biology*. 3rd ed. New York: Chapman and Hall/CRC, 2003, 488 p.
- [35] Srinagesh K. *The Principles of Experimental Research*. Waltham, Massachusetts (United States): Butterworth-Heinemann, 2005, 432 p.
- [36] Zar J.H. *Biostatistical Analysis: Fifth Edition*. Edinburg Gate: Pearson New International edition – Pearson Education Limited, 2014, 756 p.
- [37] Kramer P.J. The role of physiology in forestry. *The Forestry Chronicle*, 1956, v. 32, iss. 3, pp. 297–308. DOI: <http://dx.doi.org/10.5558/tfc32297-3>
- [38] Kshatriya K., Whitehill J., Madilao L., Henderson H., Kermod A., Kolotelo D., Bohlmann J. Histology of resin vesicles and oleoresin terpene composition of conifer seeds. *Canadian J. of Forest Research*, 2018, v. 48, no. 9, pp. 1073–1084. DOI: 10.1139/cjfr-2018-0164
- [39] Besschetnov P.V., Besschetnova N.N. *Spetsifika sodержaniya krakhmala v tkanyakh pobegov raznykh vidov topoley* [Specifics of starch content in the tissues of shoots of different types of poplars]. *Vestnik Nizhegorodskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* [Bulletin of the Nizhny Novgorod State Agricultural Academy], 2020, no. 2 (26), pp. 23–34.
- [40] Marron N., Brignolas F., Delmotte F.M., Dreyer E. Modulation of leaf physiology by age and in response to abiotic constraints in young cuttings of two *Populus deltoides* × *P. nigra* genotypes. *Annals of Forest Science*, 2008, v. 65, no. 4, art. no. 404, 8 p. DOI: 10.1051/forest:2008016
- [41] Besschetnova N.N. *Sravnitel'naya otsenka plyusovykh derev'ev sosny obyknovennoy po sodержaniyu krakhmala v pobegakh* [Comparative evaluation of plus trees of Scots pine on the content of starch in the shoots]. *Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* [Bulletin of the Mari State Technical University. Series: Forest. Ecology. Nature management], 2010, no. 2 (9), pp. 49–55.

- [42] Besschetnova N.N. *Genotipicheskaya neidentichnost' plyusovykh derev'ev sosny obyknovennoy po sodержaniyu krakhmala* [Genotypic non-identity of plus trees of common pine in terms of starch content]. *Izvestiya Orenburgskogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Orenburg Agrarian University], 2013, no. 4 (42), pp. 20–23.
- [43] Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Kul'kova A.V., Mishukova I.V. *Soderzhanie krakhmala v tkanyakh pobegov raznykh vidov eli (Picea A. Dietr.) v usloviyakh introduktsii* [Starch content in the tissues of shoots of different types of spruce (*Picea A. Dietr.*) under the introduction conditions]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2017, no. 4, pp. 57–68. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.4.57
- [44] Besschetnova N.N., Kul'kova A.V. *Soderzhanie zapasnykh pitatel'nykh veshchestv v kletkakh tkaney godichnykh pobegov predstaviteley roda el' (Picea L.) v usloviyakh Nizhegorodskoy oblasti* [Content of spare nutrients in tissue cells of annual shoots of representatives of the genus spruce (*Picea L.*) in the conditions of the Nizhny Novgorod region]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2019, no. 6, pp. 52–61. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.6.52
- [45] Kul'kova A.V., Besschetnova N.N., Besschetnov V.P. *Mnogoparametricheskyy analiz v otsenke vidospetsifichnosti predstaviteley roda el' (Picea)* [Multiparametric analysis in the assessment of species specificity of representatives of the genus spruce (*Picea*)]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2018, no. 6, pp. 23–38. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.6.23

Authors' information

Besschetnov Vladimir Petrovich — Dr. Sci. (Biology), Professor, Head of the Department of Forest crops of the Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, lesfak@mail.ru

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

Besschetnov Petr Vladimirovich — Post-graduate student of the Department of forest crops of the Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, selhoznauka@mail.ru

Received 24.08.2020.

Accepted for publication 30.11.2020.

УДК 631.531:504.064.2

DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-32-44

КАЧЕСТВО ПЫЛЬЦЫ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ (*PINUS SYLVESTRIS* L.) В ЗОНЕ ДЕЙСТВИЯ ВЫБРОСОВ АО «КАРАБАШМЕДЬ»

С.Г. Махнева^{1,2}, С.Л. Менщиков¹¹ФГБУН Ботанический сад УрО РАН, 620130, Россия, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 202 а²ФГАОУ ВО «Российский государственный профессионально-педагогический университет», Россия, 620012, г. Екатеринбург, ул. Машиностроителей, д. 11

makhniovasg@mail.ru

Приведены результаты изучения состояния зрелой пыльцы древостоев сосны обыкновенной в зоне действия дымовых выбросов предприятия АО «Карабашмедь» в связи с повышением уровня техногенной нагрузки. Показано, что состояние сосновых древостоев зависит от уровня техногенного загрязнения, определенного по степени накопления аэрополлютантов в снежном покрове. Выявлены симптомы хронического и острого повреждения ассимиляционного аппарата и нарушение генеративной сферы сосны на удалении 4 и 8 км от источника выбросов в юго-восточном направлении. Обнаружено значительное сходство жизненного состояния древостоев сосны из зоны слабого уровня аэрозольного загрязнения и фоновых условий, однако в пуле зрелой пыльцы древостоя из зоны слабого уровня загрязнения многократно выше частота встречаемости мелкой и дегенерированной пыльцы, тогда как в древостое в фоновых условиях выше частота встречаемости пыльцевых зерен с аномалиями воздушных мешков. Определена высокая чувствительность мужской генеративной системы к техногенному загрязнению (накопленному почвенному, аэрозольному, газовому), указано на возможность его биоиндикации в отсутствие симптомов повреждения ассимиляционного аппарата. Приведены данные, подтверждающие фиксацию нарушений в развитии мужского гаметофита в зонах техногенного загрязнения уже на ранних стадиях развития микроспор, обнаруженных по высокой частоте встречаемости мелкой недоразвитой пыльцы. Установлено соответствие большей части деревьев сосны, произрастающих на грунте мелко-каменисто-песчаного состава, категориям ослабленных и усыхающих, что позволяет признать условия насыпного грунта крайне неблагоприятными для ее роста и развития. Сделан вывод о негативном воздействии дымовых выбросов АО «Карабашмедь» на состояние сосновых насаждений и мужской генеративной системы сосны даже на значительном расстоянии от источника выбросов.

Ключевые слова: пыльцевое зерно, мужской гаметофит, техногенное загрязнение, биоиндикация

Ссылка для цитирования: Махнева С.Г., Менщиков С.Л. Качество пыльцы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в зоне действия выбросов АО «Карабашмедь» // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 1. С. 32–44. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-32-44

Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) (далее — сосна), вследствие широкой экологической амплитуды, способна произрастать в разнообразных условиях окружающей среды. Сосну относят к ранним сукцессионным видам за ее способность осваивать гари, отвалы и скальные грунты. Однако репродуктивные возможности сосны в экстремальных для вида условиях ограничены, что обусловлено высокой уязвимостью генеративной системы к действию неблагоприятных факторов. Многими исследованиями показано негативное воздействие природных (климатических и метеорологических) факторов на репродукцию сосны [1–5]. Техногенное загрязнение также способно влиять на качественные и количественные параметры семян и пыльцы сосны [6–9]. Совместное влияние атмосферного техногенного загрязнения и неблагоприятного почвенного питания на развитие генеративной системы сосны мало изучено. Между тем лесные культуры, созданные в 1970–1980-х гг. на техногенно загрязненных территориях и рекультивированных землях, находятся под воздействием указанных факторов.

Экосистемы окрестностей г. Карабаша неоднократно составляли объект научных исследований [10–16].

Во-первых, научный интерес обусловлен необходимостью исследования биологических последствий более чем столетнего воздействия токсичных дымовых выбросов на биоту и здоровье человека, а также факторов, приведших к уничтожению природных объектов, утрате их количественных и качественных параметров.

Во-вторых — необходимостью поиска путей разрешения тяжелейшего экологического кризиса в условиях продолжающегося техногенного загрязнения.

Основным источником техногенного загрязнения окрестностей г. Карабаша являются предприятия по производству меди. Медеплавильное производство возникло на территории нынешнего г. Карабаша в 1837 г., когда первый медеплавильный завод выплавил первые тонны меди. Нынешнее предприятие — АО «Карабашмедь» под управлением Русской медной компании — было пущено в 1910 г. Используемые на заводе технологии и оборудование, передовые на момент

открытия предприятия, за многие десятилетия работы принципиально не изменялись и не соответствовали требованиям экологической безопасности и условиям промсанитарии. На 1 т черновой меди, выплавленной на предприятии до 1974 г., приходилось более 7 т выбросов в атмосферу; в настоящее время — 3,75 т [17]. До 1957 г. комбинат работал без хвостохранилищ, все отходы сбрасывал в пойму р. Сак-Элга, что привело к значительному загрязнению водоемов района исследований [18]. В период с максимальным объемом выбросов (1965–1988 гг.) в окружающую среду ежегодно поступало до 164 тыс. т сернистого газа. Так, в 1986 г. в атмосферу было выброшено 160 тыс. т SO_2 , а также более 13 тыс. т пыли, в состав которой входили соединения меди (1,04 тыс. т), цинка (325 т), мышьяка (22 т), кадмия (1,04 т) [18]. В почвах в окрестностях предприятия, было зафиксировано превышение содержания соединений металлов (меди, цинка, свинца, мышьяка, кадмия, ртути) в 3–25 раз, по сравнению с контрольными образцами почв [15, 18].

На основании результатов государственной экологической экспертизы 1996 г. селитебные и прилегающие территории г. Карабаша были признаны зонами экологического бедствия и чрезвычайной экологической ситуации. С начала XXI в. на предприятии в несколько этапов была проведена модернизация производства, в задачи которой входило улучшение условий труда, снижение техногенного воздействия предприятия на окружающую среду [18, 19]. Благодаря реконструкции объем выбросов был существенно снижен. Однако более чем столетний период воздействия предприятия на природную среду привел к деградации природных экосистем и уничтожению растительности и почвенного покрова на ближайших к предприятию территориях.

Естественное восстановление растительного покрова на подобных территориях затруднено, поскольку почвенный покров пересыщен аэро-поллютантами либо деградировал. Препятствует процессам лесовосстановления также отсутствие источников семенного материала вследствие смещения границ природных экосистем на многие километры.

Со второй половины XX в. в окрестностях г. Карабаша начали проводить мероприятия по рекультивации и восстановлению лесных экосистем. В настоящее время многие культуры перешли в репродуктивную стадию онтогенеза. Способны ли они стать источником пыльцы и семенного материала и, следовательно, основой для дальнейшего лесовосстановления, в том числе на загрязненных и нарушенных землях? Ответ на этот вопрос может дать изучение репродукции древесных лесообразующих видов растений.

Цель работы

Целью работы — изучение состояния мужской генеративной системы древостоев сосны обыкновенной, произрастающих на зональных почвах и насыпном грунте в условиях разного уровня техногенного загрязнения атмосферы АО «Карабашмедь». Этап формирования пыльцы является критическим звеном репродукции сосны, поскольку она возобновляется только семенным путем, а опыление и оплодотворение семян сосны являются обязательными условиями формирования семян.

Объекты и методы исследования

Карабашский медеплавильный завод расположен в Саймоновской долине — естественной депрессии, окруженной цепью гор и возвышенностей, относительная высота которых не превышает 200...250 м. Исследования проведены на территориях Кыштымского и Миасского лесничеств, соответственно, Карабашского и Новоандреевского участков лесничеств. Район г. Карабаша отнесен к лесной зоне Уральской горно-лесной лесорастительной области [20]. Климат континентальный. Среднегодовая температура января составляет $-16,3^\circ$, июля — $+15,7^\circ$. Снег выпадает в октябре–ноябре и сохраняется до апреля [21]. Преобладают западные, юго- и северо-западные направления ветров. Почвы разнообразны: бурые горно-лесные, бурые лесные, оподзоленные глееватые, серые горно-лесные, горно-подзолистые типы. Характерна сильная каменистость и невысокая мощность почвенного профиля. Лесистость района исследований составляет 79,7 и 71,4 % на территориях соответственно Кыштымского и Миасского лесничеств [21]. Лесной фонд представлен преимущественно защитными лесами. Высокопроизводительные насаждения (Ia, I и II классов бонитета) составляют 51 % площади, покрытой лесной растительностью, что свидетельствует о благоприятных условиях для произрастания основных лесообразующих пород на территории лесничеств [21].

Объектами исследования были культуры сосны обыкновенной 3-го класса возраста, произрастающие в окрестностях г. Карабаша на различном расстоянии от него. В насаждениях сосны были заложены пробные площади (ПП). Для исследования репродукции на ПП были отобраны и промаркированы модельные деревья сосны, которые ежегодно формировали мужские и женские шишки. ПП 11-2, ПП 21 и ПП 20 заложены в древостоях сосны, произрастающих на зональных почвах на удалении 8, 13 и 19 км от основного источника техногенного загрязнения в восточном, юго-восточном и южном направлениях от пред-

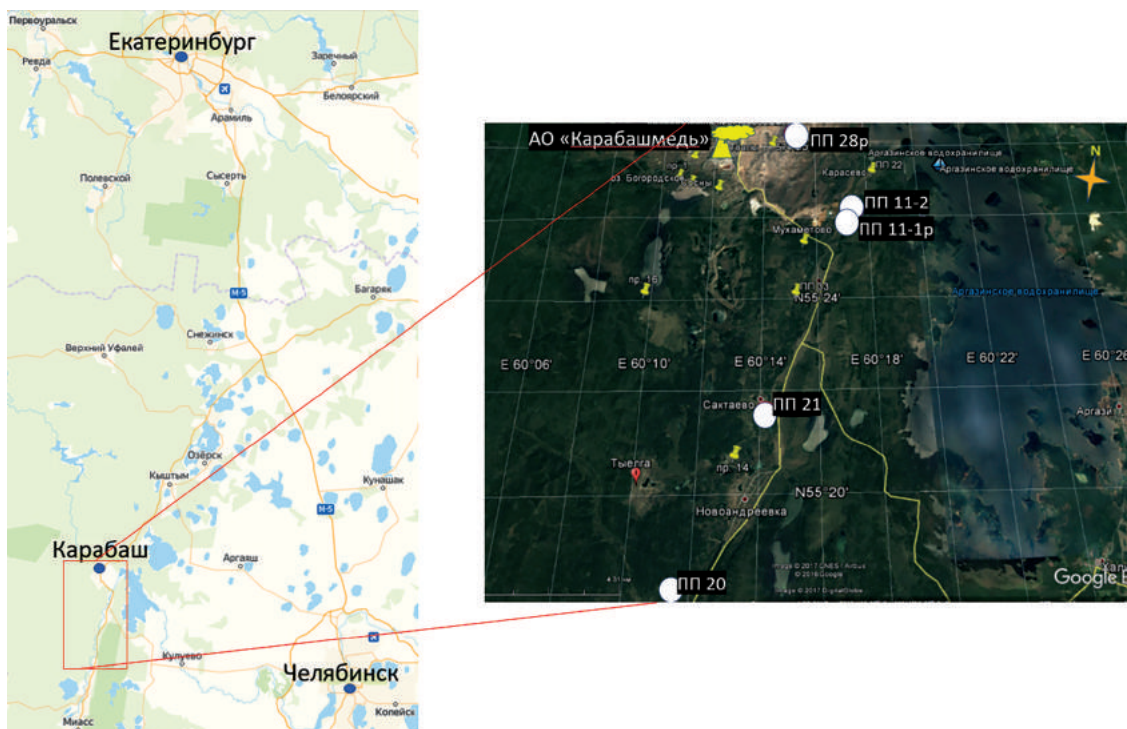


Рис. 1. Район и объекты исследований
Fig. 1. Area and research objects

приятия (рис. 1). ПП 28р и ПП 11-1р заложены в культурах сосны на насыпном грунте мелкокаменно-песчаного состава на удалении 4 и 8 км в восточном и юго-восточном направлениях.

Методы исследования

Уровень техногенного загрязнения зоны исследования определяли по накоплению загрязняющих веществ в снежном покрове [22]. Наличие большого количества газообразных выбросов в составе дымовых газов, а также выделение газов из твердых отходов производства (отвалы, хвостохранилища) требуют введения дополнительных критериев для оценки реального уровня техногенного воздействия. Поэтому при определении уровня техногенной нагрузки на насаждения учитывали состояние древостоев по комплексу показателей: дефолиации крон, сроку жизни хвои, ее длине, наличию хлорозов и некрозов, наличию и степени разложения лесной подстилки [23].

Пыльцу сосны собирали перед пылением отдельно с каждого модельного дерева всех изучаемых древостоев. Зрелую пыльцу отделяли от тканей микростробила просеиванием. До проращивания пыльцу хранили в эксикаторе при температуре 22°, далее — в холодильнике. Качество зрелой пыльцы оценивали по показателям фертильности, характеризующей потенциальную пригодность пыльцевого зерна к опылению и

оплодотворению семяпочки, и жизнеспособности, характеризующей его возможность прорасти, формировать пыльцевую трубку. Фертильность пыльцы определяли по морфологической полноценности пыльцы, содержанию в ней крахмала и липидов. Пыльца с аномалиями была разделена на три крупные группы: 1) с морфологическими нарушениями (мелкая, крупная; с аномалиями воздушных мешков, формы тела, оболочки); 2) цитологическими нарушениями (плазмолизом, пикнозом, хроматолизом и др.); 3) с обоими типами нарушений (дегенерированная). Жизнеспособность пыльцы определяли по ее возможности прорасти на искусственной питательной среде, по длине и параметрам пыльцевой трубки [24, 25]. Пыльцу проращивали в течение трех дней в климат-камере Sanyo MLR-351H при температуре 26° и влажности 60 % в капле дистиллированной воды. Микроскопию пыльцы проводили на микроскопе AxioScore.A1 (Zeiss), с камерой AxioCam MR5, применяя программы обработки изображения AxioVision Rel 4.8. Для статистической обработки данных использовали методы дескриптивной и многомерной статистики.

Результаты и обсуждение

Характеристика жизненного состояния исследуемых древостоев представлена в табл. 1. Состояние 82 и 96 % деревьев на ПП 21 и ПП 20 было оценено нами как фоновое (деревья не имели признаков ощутимых повреждений). На ПП 11-2,

Т а б л и ц а 1

Локализация и жизненное состояние исследуемых древостоев

Localization and life state of the studied stands

Пробная площадь	Направление от предприятия	Возраст, лет	Расстояние от источника, км	Почвенные условия	Дефолиация, %	Срок жизни хвои, лет
ПП 28р	В.	40	4	Насыпной грунт	40...95	1...3
ПП 11-1р	Ю.-в.	~50	8	То же	10...80	1...4
ПП 11-2	«←→»	~50	8	Зональные почвы	5...60	2...4
ПП 21	«←→»	40	13	То же	5...25	3...4
ПП 20	Ю.	40	19	«←→»	5...25	3...4



a



б

Рис. 2. Сосновые древостои на ПП 28р (*a*) и ПП 11-1р (*б*)
Fig. 2. Pine stands on PP 28r (*a*) and PP 11-1r (*б*)

на удалении 8 км от источника, 59 % деревьев не имели признаков повреждения кроны, доля ослабленных составляла 22 %, сильно ослабленных и усыхающих – соответственно 15 и 4 %.

Более 65 % живых деревьев сосны на ПП 28р были отнесены нами к 4-му классу жизненного состояния (усыхающие). У части деревьев степень дефолиации достигала 90 %, живая хвоя отмечена только на концах ветвей (хвоя первого года жизни) (рис. 2, *a*). У отдельных деревьев (9 %) дефолиация не превышает 40 %, однако изменена форма кроны, сильно развиты ветви нижней части кроны, расположенные очень близко к

почве, на которых могут формироваться мужские шишки. Состояние 20 % деревьев на ПП 11-1р соответствует категории фоновых; 52 % деревьев были охарактеризованы как ослабленные, высока также доля сильно ослабленных (20 %) и усыхающих (8 %) деревьев (рис. 2, *б*). Почвенный покров и травянистая растительность в обоих древостоях практически отсутствуют.

ПП 11-1р находится на удалении ~100 м от ПП 11-2. Обе площади характеризуются равными уровнями атмосферного техногенного загрязнения, но разными условиями корневого питания. Значительные различия, выявленные в состоянии

Т а б л и ц а 2

Характеристика техногенного загрязнения снежного покрова района исследований

Technogenic pollution characteristics of the snow cover of the study area

Точка отбора проб снега; пробная площадь	Расстояние от источника загрязнения, км	Содержание, г/м ²			pH
		Взвешенные вещества	Сухой остаток	Сумма	
ТОПС 18	1,2	22,83	2,63	25,46	6,16
ТОПС 17	2,7	17,05	2,65	19,70	7,00
ПП 28	4,0	4,37	7,47	11,85	5,82
ПП 11	7,6	1,52	2,76	4,28	5,96
ПП 21	12,8	2,03	2,22	4,25	6,15
ПП 20	18,7	1,52	0,49	2,02	6,29

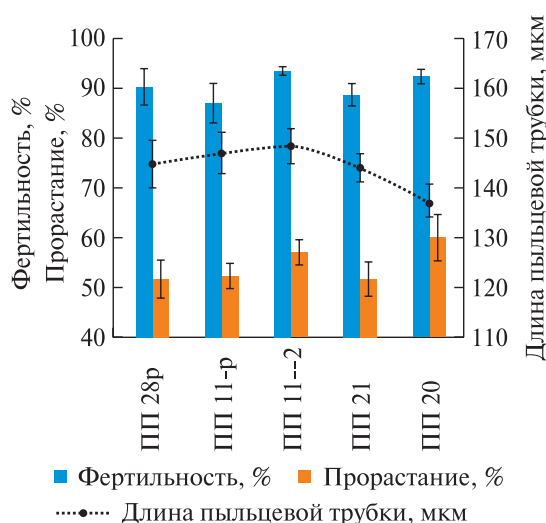


Рис. 3. Фертильность и жизнеспособность пыльцы
Fig. 3. Fertility and pollen viability

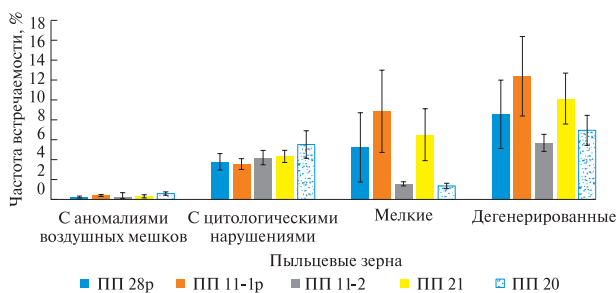


Рис. 4. Частота встречаемости пыльцевых зерен с разными типами аномалий, %
Fig. 4. Incidence degree of pollen grains with different types of anomalies, %

исследуемых насаждений и ассимиляционного аппарата сосны (см. табл. 1), свидетельствуют о крайне неблагоприятном действии условий насыпного грунта на рост и развитие деревьев сосны на ПП 11-1р и ПП 28р. В литературе отмечены случаи усыхания древостоев в неблагоприятных почвенных условиях [26].

Уровень техногенного загрязнения определяли по содержанию загрязняющих веществ в снежном покрове в точках отбора проб снега (ТОПС) и на ПП (табл. 2). В соответствии с комплексом пока-

зателей атмосферного техногенного загрязнения и состоянием древесной растительности были выделены следующие зоны:

- очень высокого уровня техногенной нагрузки — ТОПС 18 и 17, находящиеся на удалении соответственно 1,2 и 2,7 км от предприятия в восточном и юго-западном направлениях, где отсутствует древесная растительность;
- сильного — ПП 28, находящаяся на удалении 4 км;
- среднего — ПП 11, 8 км;
- слабого — ПП 21, 13 км;
- фонового — ПП 20, 19 км от источника.

На малом расстоянии от завода основным загрязнителем атмосферного воздуха определена фракция нерастворимых в воде веществ (взвешенных веществ), тогда как на удалении 4, 8 и 13 км — мелкодисперсная фракция растворимых в воде веществ (сухой остаток) (см. табл. 2). Мелкодисперсная фракция дымовых выбросов может переноситься на значительные расстояния в атмосфере; вещества затем оседают и накапливаются во всех компонентах окружающей среды в виде подвижных водорастворимых форм, которые обладают высокой биологической активностью [27].

Рассмотрим результаты изучения качества пыльцы сосны исследуемых древостоев. Значения показателя фертильности пыльцы сосны всех древостоев варьируют в диапазоне 87,0...93,7 % (рис. 3); достоверных различий между ПП по данному показателю не установлено.

Пыльца сосны разных древостоев при близких значениях показателя фертильности характеризуется своеобразием спектров аномалий. Так, в фоновом древостое основной вклад в стерильность пыльцы вносят пыльцевые зерна типичного для зрелой пыльцы размера с цитологическими нарушениями (пикноз, плазмолиз и др.), на их долю приходится 73 % пыльцевых зерен с аномалиями (рис. 4). 18 % аномальной пыльцы фонового древостоя отнесено к категории мелкой, 8 % пыльцы имело нарушения строения, развития и/или числа воздушных мешков. Пыльца с цитологическими нарушениями достаточно редко выявляется на пер-

вом этапе гаметогенеза до начала проталлиальных делений [25]. Таким образом, микроспоры сосны фонового древостоя на ранних стадиях развития имеют высокую жизнеспособность, увеличиваются в размерах, формируют полноценные воздушные мешки, т. е. благополучно проходят первые стадии микрогаметогенеза. Признаки дегенерации цитоплазмы и ядер таких пыльцевых зерен проявляются позднее, на стадиях проталлиальных делений. Аналогичный спектр аномалий был выявлен для древостоя ПП 11-2 (68, 26 и 7 % соответственно). Для фонового древостоя отметим относительно более высокую частоту встречаемости пыльцы с аномалиями воздушных мешков, которая превышает аналогичный показатель для других древостоев в 1,4–2,6 раза (см. рис. 4). Согласно литературным данным, причинами аномалий в строении оболочек пыльцевых зерен и воздушных мешков (их числа и размеров) могут быть как природные, так и антропогенные факторы [28].

Для других древостоев из зон техногенного загрязнения спектр аномалий пыльцы имеет принципиально иную структуру. Основной вклад в стерильность вносит мелкая недоразвитая пыльца (см. рис. 4) — на ее долю приходится от 55 до 68 %; 28...41 % приходится на пыльцу с цитологическими нарушениями; 3...4 % — на пыльцу с аномалиями воздушных мешков. Таким образом, количество мелкой недоразвитой пыльцы в зонах техногенного загрязнения выше в 1,2–6,5 раза, чем в фоновом древостое. Мелкая пыльца — это пыльца, остановившаяся в развитии на стадии микроспор, не способная к росту, формированию полноценных воздушных мешков, проталлиальным делениям и в целом к формированию мужского гаметофита. Частота мелкой пыльцы в пуле зрелой пыльцы отражает частоту ранней реализации нарушений в мужской генеративной системе.

Для определения функциональной полноценности пыльцу проращивали на питательной среде. На третий день опыта пыльца сосны фонового древостоя характеризовалась более высокими значениями показателя прорастания (см. рис. 3), но формировала пыльцевые трубки пыльцы несколько короче, по сравнению с пыльцой из зон техногенного загрязнения. Однако пыльцевые трубки пыльцы сосны загрязненных территорий характеризовались достоверно более высокой частотой вздутий и ветвлений — признаков, характеризующих качество самих пыльцевых трубок пыльцы и в целом пыльцы (табл. 3). Частота встречаемости пыльцевых трубок пыльцы с аномалиями развития в зонах техногенного загрязнения выше на 9...38 %, чем в фоновом древостое.

Содержание запасных веществ является еще одной важной физиологической характеристикой зрелого пыльцевого зерна сосны. По содержанию

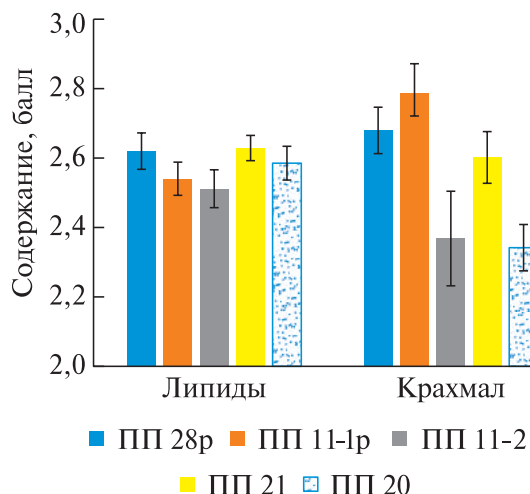


Рис. 5. Содержание липидов и крахмала в пыльце (средний балл)

Fig. 5. The content of lipids and starch in pollen (average score)

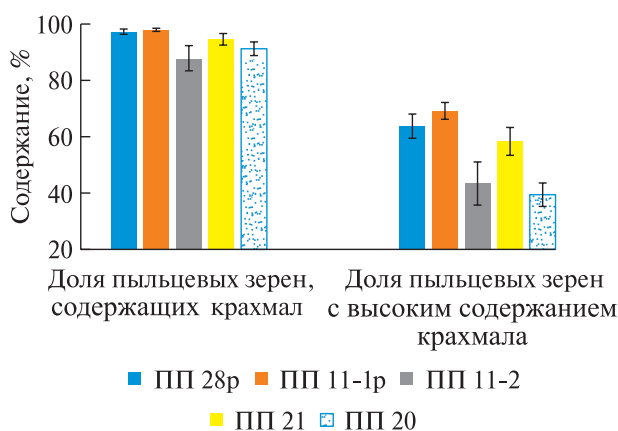


Рис. 6. Пыльцевые зерна с крахмалом

Fig. 6. Pollen grains with starch

липидов в зрелой пыльце сосны различий между исследуемыми древостоями не выявлено (рис. 5). Содержание крахмала в пыльце фонового древостоя достоверно ниже, чем в условиях техногенного загрязнения (см. табл. 3). Эту закономерность отражает как средний уровень содержания крахмала в зрелой пыльце сосны (см. рис. 5), так и доля пыльцевых зерен, имеющих крахмал и особенно имеющих высокий (3–4 балла) уровень накопления крахмала (рис. 6).

Таким образом, пыльца фонового древостоя по сравнению с пыльцой из зон техногенного загрязнения имеет равное с ними среднепопуляционное значение показателя фертильности, более высокое — показателя прорастания при существенно более низком уровне содержания крахмала в пыльце. Пыльца фонового древостоя значительно реже формирует пыльцевые трубки с нарушениями развития, чем пыльца из зон техногенного загрязнения. Относительно высокая

Достоверность различий между древостоями из зон техногенного загрязнения и фоновым древостоем по показателям пыльцы

Differences between stands from technogenic pollution zones and the background stand in terms of pollen indicators

Показатель	Значения p для t -критерия Стьюдента				Результаты дисперсионного анализа	
	ПП 28р и ПП 20	ПП 11-1р и ПП 20	ПП 11-2 и ПП 20	ПП 21 и ПП 20	Значения критерия Фишера, F	Вероятность, p
Длина пыльцевых трубок пыльцы (среднее), мкм	0,19	0,077	0,026	0,111	1,296	0,281
Максимальная длина пыльцевых трубок пыльцы, мкм	0,086	0,042	0,058	0,268	1,567	0,194
Частота встречаемости пыльцы со вздутиями пыльцевых трубок, %	0,16	0,043	0,022	0,358	2,440	0,056
Содержание крахмала в пыльце (среднее), балл	0,001	0,000	0,802	0,017	5,264	0,001
Доля пыльцевых зерен, имеющих крахмал, %	0,026	0,005	0,468	0,181	3,330	0,015
Доля пыльцевых зерен, имеющих высокий уровень крахмала, %	0,001	0,000	0,621	0,007	6,706	0,000
<i>Примечание.</i> Жирным шрифтом выделены значения $p \leq 0,05$						

частота встречаемости пыльцы с аномалиями воздушных мешков в древостое в фоновых условиях свидетельствует об экологическом неблагополучии условий произрастания древостоя, которые не оказывают значимого влияния на ассимиляционный аппарат сосны, но проявляются в нарушениях развития мужского гаметофита.

Корреляционный анализ, проведенный по результатам исследования зрелой пыльцы сосны на трех ПП относительно градиента атмосферного техногенного загрязнения, выявил взаимосвязь между расстоянием от источника аэрополлютантов и длиной пыльцевых трубок пыльцы ($r = -0,358$) (здесь и далее значения r достоверны при $p < 0,05$), а также частотой встречаемости пыльцы, формирующей дефектные пыльцевые трубки ($r = -0,405$). Длина пыльцевых трубок пыльцы, в свою очередь, положительно коррелирует с уровнем накопления крахмала в зрелой пыльце ($r = 0,445$) и частотой встречаемости пыльцы с высоким уровнем накопления крахмала ($r = 0,468$). Таким образом, пыльца сосны всех древостоев с высоким уровнем накопления крахмала к третьему дню опыта формирует более длинные пыльцевые трубки. Пыльцевые трубки пыльцы из зон техногенного загрязнения растут интенсивнее, что может быть обусловлено более высоким содержанием крахмала в пыльце, однако они при этом характеризуются большей частотой аномалий.

Для других показателей пыльцы и ее пыльцевых трубок не найдено достоверно значимых связей с увеличением расстояния от источника аэрополлютантов. Исследования, проведенные

нами ранее в других промышленных центрах Урала [25, 29], и работы [28, 30–32] указывают на наличие определенных закономерностей в реакции мужской генеративной системы на действие техногенного загрязнения. Так, в качестве биоиндикаторов уровня техногенной нагрузки нами ранее были предложены некоторые параметры пыльцы, характеризующие ее фертильность (например, частота встречаемости диад) и жизнеспособность (показатели прорастания и длины пыльцевых трубок пыльцы).

В качестве возможных причин отсутствия подобных закономерностей реакции мужской генеративной системы сосны на разные уровни техногенного загрязнения окружающей среды АО «Карабашмедь» назовем следующие.

Во-первых, дымовые выбросы медеплавильного производства включают в себя газообразную фракцию (в основном SO_2), на долю которой приходится 65...90 % объема выбросов в атмосферу [18]. Концентрации SO_2 в подфакельной зоне предприятия на удалении 1 км от источника в 2000 г. составили до 20 000 мг/м³ [33]. Газовая фракция переносится на далекие расстояния; ее хронические эффекты диагностируют на значительном расстоянии от источника выбросов по состоянию ассимиляционного аппарата растений [10, 23]. Острое воздействие высокой концентрации газов дымовых выбросов АО «Карабашмедь» было выявлено нами на ПП и в других насаждениях в окрестностях города по некрозам хвои и листьев, массовому пожелтению и опадению листьев березы в летний период, массовой гибели генеративных и вегетативных почек сосны.

Во-вторых, окрестности г. Карабаша относят к территориям с огромным накопленным экологическим ущербом. Концентрация ртути в почве превышает предельно допустимые концентрации в 2 раза, мышьяка — в 279 раз, меди — в 368 раз, свинца — в 300 раз [34], кадмия — в 5,2 раза, цинка — 3,8 раза [35]. Расчетная пылевая нагрузка на площади 30 км² в 1970-е гг. могла достигать 2,6 т/км²·сут [36], при этом фоновый уровень поступления пыли для района исследований, рассчитанный по результатам изучения снежного покрова в 2000 г., составлял 10...15 кг/км²·сут [12]. Колоссальный уровень техногенного загрязнения почв района исследований, сформированный за многие десятилетия работы предприятия, и газовое загрязнение им атмосферы обуславливают аккумуляцию загрязняющих веществ в тканях растений и повреждение вегетативной и генеративной систем растений древостоев, в том числе удаленных от источника выбросов.

Дискриминантный анализ позволил оценить уровень различий между древостоями сосны по комплексу показателей зрелой пыльцы. Провели сравнение древостоев ПП 11-2, ПП 21 и ПП 20, которые произрастают на зональных почвах, по градиенту аэрозольного атмосферного техногенного загрязнения в юго-восточном и южном направлениях от источника дымовых выбросов. Были выявлены достоверно значимые различия между ними по комплексу показателей пыльцы ($p < 0,05$) (рис. 7).

Основной вклад в дискриминацию древостоев вносят показатели частоты встречаемости пыльцевых трубок пыльцы со вздутиями, содержания запасных веществ (крахмала и липидов в сумме), доли пыльцы с аномалиями воздушных мешков и максимального значения длины пыльцевой трубки пыльцы.

Особый интерес представляют результаты сравнения древостоев ПП 11-1р и ПП 28р, которые произрастают на насыпном грунте в сходных условиях корневого питания, но различаются по уровню атмосферного техногенного загрязнения, а также древостой ПП 11-1р и ПП 11-2, которые произрастают при равных условиях атмосферного загрязнения, но в разных условиях корневого питания. Результаты дискриминантного анализа (рис. 8) указывают на значительное сходство между древостоями ПП 28р и ПП 11-1р ($p = 0,626$), а также на достоверно значимые различия между древостоями ПП 11-1р и ПП 11-2 ($p < 0,05$) по параметрам мужской генеративной системы.

Основной вклад в дискриминацию древостоев вносят показатели, характеризующие накопление запасных веществ в зрелой пыльце, долю пыльцы с аномалиями воздушных мешков в спектре аномалий, частоты встречаемости дегенерированной

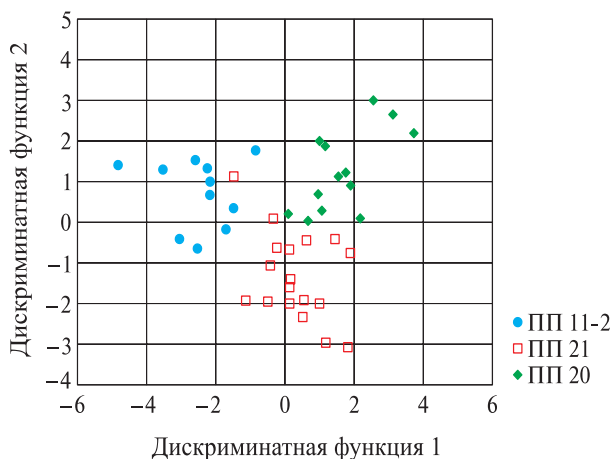


Рис. 7. Результаты дискриминантного анализа древостоев пробных площадей по градиенту атмосферного техногенного загрязнения

Fig. 7. The results of the discriminant analysis of the stands on the trial plots along the gradient of atmospheric technogenic pollution

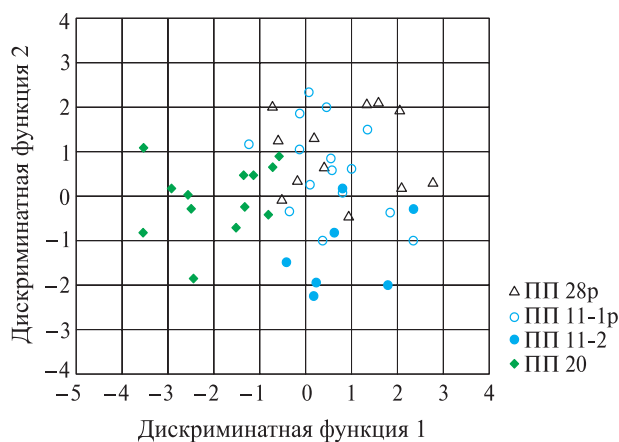


Рис. 8. Результаты дискриминантного анализа древостоев пробных площадей в разных условиях корневого питания

Fig. 8. Results of discriminant analysis of stands on trial plots under different conditions of root nutrition

пыльцы и частоты встречаемости пыльцевых трубок пыльцы со вздутиями. Приведенные данные свидетельствуют о значительном влиянии как атмосферного загрязнения, так и условий корневого питания на формирование мужской генеративной системы сосны, на ее качественные показатели.

Выводы

В окрестностях г. Карабаша вследствие многолетнего действия дымовых выбросов АО «Карабашмедь» сформирована обширная зона техногенного загрязнения. Состояние растительного покрова в целом находится в соответствии с выделенными нами на основании анализа состава снеговой воды зонами техногенного загрязнения. В подфакельной зоне предприятия растительный покров отсутствует. Сосновые древостой отсут-

ствуют на удалении до 3,5 км от источника дымовых выбросов. На удалении 8 км в юго-восточном направлении сформирована зона хронического техногенного загрязнения, которая характеризуется наличием древесной растительности, в том числе сосновых древостоев, имеющих симптомы хронического и острого повреждения ассимиляционного аппарата и нарушения генеративной сферы. Отметим значительное сходство в жизненном состоянии древостоев на удалении 13 км (слабый уровень загрязнения) и 19 км (фоновый уровень) от источника, при этом различия в содержании загрязняющих веществ в снежном покрове достигают от 1,3 до 4,5 раза (в зависимости от фракции). В пуле зрелой пыльцы древостоя на удалении 13 км частота встречаемости мелкой и дегенерированной пыльцы выше в 4,8 и 1,5 раза соответственно, чем в фоновых условиях.

На удалении 19 км от предприятия степень загрязнения снежного покрова аэрополлютантами ниже в 15 раз, чем на ближайших к источнику выбросов территориях. Однако состояние мужской генеративной системы сосны в условиях фонового уровня загрязнения атмосферы аэрозолями указывает на экологическое неблагополучие среды обитания, обусловленное, возможно, хроническим воздействием газовой фракции дымовых выбросов и почвенного загрязнения, сформированного в период интенсивных выбросов предприятия на протяжении XX века.

Зрелая пыльца сосны из зон техногенного загрязнения характеризуется равными с фоновыми значениями показателя фертильности, относительно низкими — показателя прорастания, достоверно более высокими — уровня накопления крахмала и частоты встречаемости пыльцевых трубок с нарушениями развития. Нарушения в развитии мужского гаметофита реализуются уже на ранних стадиях развития микроспор и обнаруживают себя по высокой частоте встречаемости мелкой недоразвитой пыльцы. Результаты исследования указывают на высокую чувствительность мужской генеративной системы сосны к техногенному загрязнению (накопленному почвенному, аэрозольному, газовому) и возможность его биоиндикации в отсутствие симптомов повреждения ассимиляционного аппарата.

Большая часть деревьев в древостоях сосны, произрастающих на грунте мелкокаменисто-песчаного состава, соответствует категориям ослабленных и усыхающих, что позволяет признать условия насыпного грунта крайне неблагоприятными для роста и развития сосновых древостоев. Зрелая пыльца сосны данных древостоев характеризуется своеобразием черт, отличающих ее по комплексу признаков от зрелой пыльцы других древостоев.

В целом следует признать, что многолетнее техногенное загрязнение всех компонентов окружающей среды выбросами предприятия АО «Карабашмедь» оказывает негативное воздействие на состояние сосновых насаждений и проявляется токсическими и мутагенными эффектами в мужской генеративной системе даже на значительном расстоянии от источника выбросов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Ботанического сада Уральского отделения Российской академии наук.

Список литературы

- [1] Parantainen A., Pulkkinen P. Pollen viability of Scots pine (*Pinus sylvestris*) in different temperature conditions: high levels of variation among and within latitudes // *Forest Ecology and Management*, 2002, v. 167, no. 1–3, pp. 149–160. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00722-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00722-8)
- [2] Сурсо М.В. Фенология репродуктивных циклов и качество семян хвойных (Pinaceae, Cupressaceae) в северной тайге // *Arctic Environmental Research*. 2017, № 4. С. 355–367.
- [3] Пименов А.В., Седельникова Т.С., Ефремов С.П. Морфология и качество пыльцы сосны обыкновенной в контрастных экотопах Хакасии // *Лесоведение*, 2014, № 1. С. 57–64.
- [4] Свинцова В.С., Кузнецова Н.Ф., Пардаева Е.Ю. Влияние засухи на генеративную сферу и жизнеспособность пыльцы сосны обыкновенной // *Лесоведение*, 2014, № 3. С. 49–57.
- [5] Велисевич С.Н. Качество пыльцы высокогорных популяций *Pinus sibirica* du Tour (Pinaceae) в аридных и гумидных районах Алтая // *Журнал Сибирского федерального университета. Сер. Биология*, 2017. Т. 10. № 3. С. 301–311. DOI: 10.17516/1997-1389-0014
- [6] Федорков А.Л. Половая репродукция у сосны обыкновенной при агротехническом загрязнении в условиях Субарктики // *Лесной журнал*, 1992. № 4. С. 60–64.
- [7] Носкова Н.Е., Третьякова И.Н., Носков Е.А. Особенности формирования мужской генеративной сферы сосны обыкновенной в условиях техногенеза // *Хвойные бореальной зоны*, 2006. Т. 23. № 2. С. 211–214.
- [8] Калашник Н.А. Аномалии пыльцы у сосны обыкновенной в различных экологических условиях // *Бюллетень ботанического сада Саратовского государственного университета*, 2012. № 10. С. 46–52.
- [9] Садакова К.А., Колясникова Н.Л. Фертильность пыльцевых зерен и содержание тяжелых металлов в пыльце сосны обыкновенной, произрастающей в местах с разной антропогенной нагрузкой // *Современные проблемы науки и образования*, 2014. № 6. С. 1444.
- [10] Кулагин Ю.З. О газоустойчивости сосны и березы // *Растительность и промышленные загрязнения. Охрана природы на Урале / под ред. С.А. Мамаева*. Свердловск: [б.и.], 1964. С. 115–122.
- [11] Макунина Г.С. Деградация и химические свойства почв Карабашской техногенной аномалии // *Почвоведение*, 2002. № 3. С. 368–376.
- [12] Удачин В.Н. Экогеохимия горнопромышленного техногенеза Южного Урала: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. Томск, 2012. 48 с.

- [13] Коротеева Е.В., Вейсберг Е.И., Куянцева Н.Б. Оценка состояния лесной ценофлоры в зоне воздействия Карабашского медеплавильного комбината (Южный Урал) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук (Лесные ресурсы), 2011. Т. 13. № 1(4). С. 1005–1011.
- [14] Усольцев В.А., Борников А.В., Жанабаева А.С., Воробейчик Е.Л., Колтунова А.И. Продуктивность ассимиляционного аппарата деревьев вблизи медеплавильных заводов Урала // Известия Оренбургского государственного аграрного университета, 2011. № 3 (31). С. 67–70.
- [15] Kumar A., Tripti, Maleva M., Kiseleva I., Kumar S.M., Morozova M. Toxic metal(loid)s contamination and potential human health risk assessment in the vicinity of century-old copper smelter, Karabash, Russia // Environ Geochem Health, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00414-3>
- [16] Бачурина А.В., Залесов С.В. Оценка состояния окружающей среды по показателю флуктуирующей асимметрии // Актуальные проблемы лесного комплекса, 2020. № 56. С. 98–103.
- [17] Шнейдмиллер Н.Ф., Мамедов Г.Р. Особенности развития малых городов России в условиях экологического кризиса на примере города Карабаш Челябинской области // Вестник Кемеровского государственного университета. Серия: Политические, социологические и экономические науки, 2018. № 3. С. 183–190. DOI:10.21603/2500-3372-2018-3-183-190
- [18] Калабин Г.В., Титова А.В., Шаров А.В. Модернизация медеплавильного производства комбината ЗАО «Карабашмедь» и динамика состояния природной среды в зоне его влияния // Маркшейдерия и недропользование, 2011. № 3 (53). С. 65–70.
- [19] Запарий В.В., Набойченко С.С. Медная отрасль Урала: Итоги двадцати лет реформ // Экономическая история, 2012. № 4 (19). С. 37–51.
- [20] Колесников Б.П. Леса СССР: Леса Челябинской области. М.: Наука, 1969. Т. 4. 257 с.
- [21] Залесов С.В., Бачурина А.В., Бачурина С.В. Состояние лесных насаждений, подверженных влиянию промышленных поллютантов ЗАО «Карабашмедь», и реакция их компонентов на проведение рубок обновления. Екатеринбург: УГЛТУ, 2017. 277 с. URL: <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/6620> (дата обращения 03.07.2020).
- [22] Руководство по контролю загрязнения атмосферы РД52.04.186–89. М., 1991. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200036406> (дата обращения 03.07.2020).
- [23] Менщиков С.Л. Методические аспекты оценки ущерба лесов, поврежденных промышленными выбросами на Среднем Урале // Леса Урала и хозяйство в них, 2001. Вып. 21. С. 243–251.
- [24] Паушева З.П. Практикум по цитологии растений. М.: Агропромиздат, 1988. 271 с.
- [25] Махнева С.Г., Бабушкина Л.Г., Зуева Г.В. Состояние мужской генеративной системы сосны обыкновенной при техногенном загрязнении среды. Екатеринбург: УГЛТУ, 2003. 154 с.
- [26] Богуславская Д.М., Завалишин С.И., Галецкая Г.А., Кальченко Л.И. Влияние состояния почв на усыхание сосны обыкновенной в условиях лесосеменной станции Озерского лесничества // Леса Евразии — Большой Алтай: Материалы XV Междунар. конф. молодых ученых, посвященной 150-летию со дня рождения профессора Г.Н. Высоцкого, Барнаул, 13–20 сентября 2015 г. М.: МГУЛ, 2015. С. 120–122.
- [27] Park M.V., Neigh A.M., Vermeulen J.P. The effect of particle size on the cytotoxicity, inflammation, developmental toxicity and genotoxicity of silver nanoparticles // Biomaterials, 2011, v. 32(36), pp. 9810–9817. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2011.08.085
- [28] Дзюба О.Ф. Палиноиндикация качества окружающей среды. СПб.: Недра, 2006. 198 с.
- [29] Makhniova S., Kuzmina N., Menshikov S. Quality of scots pine pollen depending on the aerotechnogenic pollution level with emissions from Reftinskiy GRES power plant // J. of Geoscience and Environment Protection, 2017, v. 5, no. 4, pp. 99–117. DOI: 10.4236/gep.2017.54009
- [30] Бессонова В.П. Состояние пыльцы как показатель загрязнения среды тяжелыми металлами // Экология, 1994. № 4. С. 45–50.
- [31] Кочубей О.В. Палиноиндикация качества окружающей среды в местах проведения подземных ядерных взрывов на Европейской территории России. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. С.-Пб., 2015. 21 с.
- [32] Решетова С.А., Сумарокова И.Е. Пыльца растений урбанизированных территорий как биоиндикатор условий техногенного загрязнения (Забайкалье) // Географические исследования, 2019. № 4. С. 15–23. DOI: 10.17223/25421379/13/2
- [33] Udachin V.N., Williamson B.J., Purvis O.W., Spiro B., Dubbin W., Herrington R.J., Mikhailova I. Assessment of environmental impacts of active smelter operations and abandoned mines in Karabash, Ural Mountains of Russia // Sust. Devel., 2003, v. 11, pp. 1–10. DOI:10.1002/sd.211
- [34] Тацкий Ю.Г. Эколого-геохимическая оценка загрязнения окружающей среды в зоне действия Карабашского медеплавильного комбината // Вестник Тюменского государственного университета. Сер. Экология и природопользование, 2012. № 12. С. 90–96.
- [35] Синявский И.В., Князева Т.Г. Тяжелые металлы в системе «почва – растение – человек» в промышленных городах горнолесной зоны Южного Урала // Агропродовольственная политика России, 2016. № 4(52). С. 59–62.
- [36] Линник В.Г., Хорошавин В.Ю., Пологрудова О.А. Дegradaция природных ландшафтов и химическое загрязнение в ближней зоне влияния Карабашского медеплавильного комбината // Вестник Тюменского государственного университета. Сер. Экология и природопользование, 2013. № 4. С. 105–114.

Сведения об авторах

Махнева Светлана Георгиевна — канд. биол. наук, доцент, ст. науч. сотрудник ФГБУН Ботанический сад УрО РАН; доцент кафедры математических и естественнонаучных дисциплин ФГАОУ ВО «Российский государственный профессионально-педагогический университет», makhniovasg@mail.ru

Менщиков Сергей Леонидович — д-р с.-х. наук, зав. лабораторией экологии техногенных растительных сообществ ФГБУН Ботанический сад УрО РАН, m.sergei1951@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.10.2020.

Принята к публикации 02.11.2020.

COMMON PINE (*PINUS SYLVESTRIS* L.) POLLEN QUALITY IN JSC «KARABASHMED» EMISSION ZONE

S.G. Makhniova^{1,2}, S.L. Menshchikov¹

¹Botanical Garden of Ural Branch of RAS, 202a, 8 Marta st., 620130, Ekaterinburg, Russia

²Russian State Professional Pedagogical University, 11, Mashinostroiteley st., 620012, Ekaterinburg, Russia

makhniovasg@mail.ru

The study results of Common pine mature pollen state in the smoke emissions from the plant JSC «Karabashmed» in connection with the level of technogenic impact are presented. It is shown that the state of the vegetation cover is in accordance with the level of technogenic pollution, determined by the accumulation degree of air pollutants in the snow cover. It was established that the soil and vegetation were degraded in the flare zone of the plant. There are no pine stands at a distance of less than 3.5 km from the source of smoke emissions. Symptoms of chronic and acute damage to the assimilation apparatus and disturbance of the generative sphere of pine at a distance of 8 km to the southeast were revealed. A significant similarity in the vital state of pine stands at a distance of 13 km (zone of low aerosol pollution) and 19 km (background conditions) from the source was established. At the same time, the frequency of small and degenerated pollen was many times higher in the pool of mature pine pollen in the stand under conditions of a low level of pollution than under background conditions. A high frequency of pollen grains with anomalies of air pockets was detected in the stand under background conditions. The results of the study indicate a high susceptibility of the male generative system to technogenic pollution (accumulated soil, aerosol, gas) and the possibility of its bioindication in the absence of symptoms of damage to the assimilation apparatus. It was shown that disturbances in the development of male gametophyte in the zones of technogenic pollution are already realized at the early stages of microspore development and are revealed by the high frequency of small underdeveloped pollen. It was found that most of the pine trees growing on the soil of fine-stone-sandy composition correspond to the categories of weakened and dying ones, which makes it possible to recognize the conditions of the man-made land as extremely unfavorable for the growth and development of pine. The mature pine pollen of these stands is characterized by the peculiar features that distinguish it from the pollen of other stands. The conclusion is made about the negative effect of smoke emissions from the JSC «Karabashmed» plant on the condition of pine plantations and the male generative system of pine, even at a considerable distance from the source of emissions.

Keywords: pollen grain, male gametophyte, technogenic pollution, bioindication

Suggested citation: Makhniova S.G., Menshchikov S.L. *Kachestvo pyl'tsy sosny obyknovennoy (Pinus sylvestris L.) v zone deystviya vybrosov AO «Karabashmed»* [Common pine (*Pinus sylvestris* L.) pollen quality in JSC «Karabashmed» emission zone]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 1, pp. 32–44.

DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-32-44

References

- [1] Parantainen A., Pulkkinen P. Pollen viability of Scots pine (*Pinus sylvestris*) in different temperature conditions: high levels of variation among and within latitudes. *Forest Ecology and Management*, 2002, v. 167, no. 1–3, pp. 149–160. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00722-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00722-8)
- [2] Surso M.V. *Fenologiya reproduktivnykh tsiklov i kachestvo semyan khvoynnykh (Pinaceae, Cupressaceae) v severnoy tayge* [Phenology of reproductive cycles and quality of seeds of conifers (Pinaceae, Cupressaceae) in the northern taiga]. *Arctic Environmental Research*, 2017, no. 4, pp. 355–367.
- [3] Pimenov A. V., Sedel'nikova T. S., Efremov S. P. *Morfologiya i kachestvo pyl'tsy sosny obyknovennoy v kontrastnykh ekotopakh Khakasii* [Morphology and quality of the Scots pine pollen in contrasting ecotopes of Khakassia]. *Russian Journal of Forest Science*, 2014, no. 1, pp. 57–64.
- [4] Svintsova V. S., Kuznetsova N. F., Pardaeva E. Yu. *Vliyaniye zasukhi na generativnyuyu sferu i zhiznesposobnost' pyl'tsy sosny obyknovennoy* [Drought impact on generative sphere and sustainability of scots pine pollen]. *Russian Journal of Forest Science*, 2014, no. 3, pp. 49–57.
- [5] Velisevich S.N. *Kachestvo pyl'tsy vysokogornyykh populyatsiy Pinus sibirica du Tour (Pinaceae) v aridnykh i gumidnykh rayonakh Altaya* [Pollen Quality of *Pinus sibirica* Du Tour (Pinaceae) Mountain Populations in Arid and Humid Regions of Altai]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta* [Journal of Siberian Federal University]. *Biology*, 2017, vol. 10 (3), pp. 301–309. DOI: 10.17516/1997-1389-0014
- [6] Fedorkov A.L. *Polovaya reproduksiya u sosny obyknovennoy pri agrotekhnicheskom zagryaznenii v usloviyakh Subarktiki* [Sexual reproduction in Scots pine under agrotechnical pollution in the Subarctic]. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*, 1992, no. 4, pp. 60–64.
- [7] Noskova N.E., Tref'yakova I.N., Noskov E.A. *Osobennosti formirovaniya muzhskoy generativnoy sfery sosny obyknovennoy v usloviyakh tekhnogeneza* [Features of the formation of the male generative sphere of scalpine pine under technogenesis conditions]. *Khvoynnye boreal'noy zony* [Conifers of the boreal area], 2006, vol. 23, no. 2, pp. 211–214.
- [8] Kalashnik N.A. *Anomalii pyl'tsy u sosny obyknovennoy v razlichnykh ekologicheskikh usloviyakh* [Pollen anomalies in scots pine under different ecological conditions]. *Byulleten' botanicheskogo sada Saratovskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Botanic Garden of Saratov State University] 2012, no. 10, pp. 46–52.
- [9] Sadakova K.A., Kolyasnikova N.L. *Fertil'nost' pyl'tsevykh zeren i sodержaniye tyazhelykh metallov v pyl'tse sosny obyknovennoy, proizrastayushchey v mestakh s raznoy antropogennoy nagruzkoj* [Fertility of pollen grains and content of heavy metals in pine pollen growing in places with different anthropogenic load]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2014, no. 6, p. 1444.

- [10] Kulagin Yu.Z. *O gazoustoychivosti sosny i berezy* [About gas resistance of pine and birch]. *Rastitel'nost' i promyshlennyye zagryazneniya. Okhrana prirody na Urale* [Vegetation and industrial pollution. Nature protection in the Urals]. Sverdlovsk, 1964, pp. 115–122.
- [11] Makunina G.S. *Degradatsiya i khimicheskie svoystva pochv Karabashskoy tekhnogennoy anomalii* [Degradation and chemical properties of soils of the Karabash technogenic anomaly]. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 2002, no. 3, pp. 368–376.
- [12] Udachin V.N. *Ekogeokhimiya gornopromyshlennogo tekhnogeneza Yuzhnogo Urala* [Ecogeochemistry of mining technogenesis of the Southern Urals]. Diss. Dr. Sci. (Geogr.). Tomsk, 2012, 48 p.
- [13] Koroteeva E.V., Veysberg E.I., Kuyantseva N.B. *Otsenka sostoyaniya lesnoy tsenoflory v zone vozdeystviya Karabashskogo medeplavil'nogo kombinata (Yuzhnyy Ural)* [Estimation of forest cenoflora state in zone of Karabashskiy cooper-smelt industrial complex impact (South Urals)]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk (Lesnye resursy)* [Bulletin of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2011, vol. 13, no. 1(4), pp. 1005–1011.
- [14] Usol'tsev V.A., Bornikov A.V., Zhanabaeva A.S., Vorobeychik E.L., Koltunova A.I. *Produktivnost' assilyatsionnogo apparata derev'ev vblizi medeplavil'nykh zavodov Urala* [Productivity of the assimilation system of trees growing in the vicinity of coppersmelting plants of the Urals]. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Orenburg State Agrarian University], 2011, no. 3, pp. 67–70.
- [15] Kumar A., Tripti, Maleva M., Kiseleva I., Kumar S.M., Morozova M. Toxic metal(loid)s contamination and potential human health risk assessment in the vicinity of century-old copper smelter, Karabash, Russia. *Environ Geochem Health*, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00414-3>
- [16] Bachurina A.V., Zalesov S.V. *Otsenka sostoyaniya okruzhayushchey sredy po pokazatelyu fluktuiruyushchey asimmetrii* [Assessment of the state of the environment by the indicator of fluctuating asymmetry]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forestry complex], 2020, no. 56, pp. 98–103.
- [17] Shneydmiller N.F., Mamedov G.R. *Osobennosti razvitiya malykh gorodov Rossii v usloviyakh ekologicheskogo krizisa na primere goroda Karabash Chelyabinskoy oblasti* [Development characteristics of small Russian towns in the conditions of ecological crisis: the case of Karabash (Chelyabinsk region)]. *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Politicheskie, sotsiologicheskie i ekonomicheskie nauki* [Bulletin of Kemerovo state university. Political, Sociological and Economic Sciences], 2018, no. 3(9). DOI:10.21603/2500-3372-2018-3-183-190
- [18] Kalabin G.V., Titova A.V., Sharov A.V. *Modernizatsiya medeplavil'nogo proizvodstva kombinata ZAO «Karabashmed» i dinamika sostoyaniya prirodnoy sredy v zone ego vliyaniya* [Upgrading the close JSC Karabashmed's coppersmelting plant and the dynamics of the natural environment changes in the affected area]. *Marksheyderiya i nedropol'zovanie* [Mine surveying and subsurface use], 2011, no. 3 (53), pp. 65–70.
- [19] Zaparyi V.V., Naboychenko S.S. *Mednaya otrasl' Urala: Itogi dvadtsati let reform* [Ural copper industry: results of twenty years of reform]. *Ekonomicheskaya istoriya* [Economic History], 2012, no. 4 (19), pp. 37–51.
- [20] Kolesnikov B.P. *Lesa SSSR: Lesa Chelyabinskoy oblasti* [Lesas SSSR: Lesas Chelyabinskoy oblasti]. Moscow: Nauka, 1969, v. 4, 257 p.
- [21] Zalesov S.V., Bachurina A.V., Bachurina S.V. *Sostoyanie lesnykh nasazhdeniy, podverzhennykh vliyaniyu promyshlennykh pollutantov ZAO «Karabashmed», i reaktsiya ikh komponentov na provedenie rubok obnovleniya* [The state of forest stands subject to the influence of industrial pollutants of CJSC «Karabashmed», and the reaction of their components to cutting updates] [Electronic resource]. Ekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, 2017, 277 p. Available at: <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/6620> (accessed 03.07.2020).
- [22] *Rukovodstvo po kontrolyu zagryazneniya atmosfery RD52.04.186–89* [Guidelines for the control of air pollution RD52.04.186–89]. Moscow, 1991. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200036406> (accessed 03.07.2020).
- [23] Menshchikov S.L. *Metodicheskie aspekty otsenki ushcherba lesov, povrezhdennykh promyshlennymi vybrosami na Srednem Urale* [Methodological aspects of assessing the damage to forests damaged by industrial emissions in the Middle Urals]. *Lesa Urala i khozyaystvo v nikh* [Forests of the Ural and the economy in them], 2001, no. 21, pp. 243–251.
- [24] Pausheva Z.P. *Praktikum po tsitologii rasteniy* [Plants Cytology Practical Work]. Moscow: Agropromizdat, 1988, 271 p.
- [25] Makhneva S.G., Babushkina L.G., Zueva G.V. *Sostoyanie muzhskoy generativnoy sistemy sosny obyknovnoy pri tekhnogenom zagryaznenii sredy* [Condition of Scots Pine Male Generative Sphere under the Environment of Technogenic Pollution]. Yekaterinburg: USFEA, 2003, 154 p.
- [26] Boguslavskaya D.M., Zavalishin S.I., Galetskaya G.A., Kal'chenko L.I. *Vliyaniye sostoyaniya pochv na usykhaniye sosny obyknovnoy v usloviyakh lesosemennoy stantsii Ozerskogo lesnichestva* [Influence of the state of soils on the drying out of Scots pine in the conditions of the forest seed station of the Ozerskoye forestry]. *Lesa Evrazii — Bol'shoy Altay: Materialy XV Mezhdunarodnoy konferentsii molodykh uchennykh, posvyashchennoy 150-letiyu so dnya rozhdeniya professora G.N. Vysotskogo* [Forests of Eurasia — Great Altai: Materials Of the XV International Conference of Young Scientists, Dedicated to the 150-th Anniversary of Professor G.N. Vysotsky], Barnaul, 13–20 September 2015. Moscow: MSFU, 2015, pp. 120–122.
- [27] Park M.V., Neigh A.M., Vermeulen J.P. The effect of particle size on the cytotoxicity, inflammation, developmental toxicity and genotoxicity of silver nanoparticles. *Biomaterials*, 2011, v. 32(36), pp. 9810–9817. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2011.08.085
- [28] Dzyuba O.F. *Palinoindikatsiya kachestva okruzhayushchey sredy* [Palynology Indication of the Environment Quality]. St. Petersburg: Nedra, 2006, 198 p.
- [29] Makhniova S., Kuzmina N., Menshchikov S. Quality of scots pine pollen depending on the aerotechnogenic pollution level with emissions from Reftinskiy GRES power plant. *J. of Geoscience and Environment Protection*, 2017, v. 5, no. 4, pp. 99–117. DOI: 10.4236/gep.2017.54009
- [30] Bessonova V.P. *Sostoyaniye pyl'tsy kak pokazatel' zagryazneniya sredy tyazhelyimi metallami* [The state of pollen as an indicator of environmental pollution with heavy metals]. *Ekologiya* [Russian Journal of Ecology], 1994, no. 4, pp. 45–50.
- [31] Kochubey O.V. *Palinoindikatsiya kachestva okruzhayushchey sredy v mestakh provedeniya podzemnykh yadernykh vzryvov na Evropeyskoy territorii Rossii* [Palinoindication of the quality of the environment in the places of underground nuclear explosions in the European territory of Russia]. Dis. Cand. Sci. (Geogr.). S.-Pb., 2015, 21 p.

- [32] Reshetova S.A., Sumarokova I.E. *Pyl'tsa rasteniy urbanizirovannykh territoriy kak bioindikator usloviy tekhnogennogo zagryazneniya (Zabaykal'e)* [Pollen of plants in urban areas as a bioindicator of industrial pollution (Transbaikalia)]. *Geosfernye issledovaniya* [Geosphere Research], 2019, no. 4, pp. 15–23. DOI: 10.17223/25421379/13/2
- [33] Udachin V.N., Williamson B.J., Purvis O.W., Spiro B., Dubbin W., Herrington R.J., Mikhailova I. Assessment of environmental impacts of active smelter operations and abandoned mines in Karabash, Ural Mountains of Russia. *Sust. Devel.*, 2003, v. 11, pp. 1–10. DOI:10.1002/sd.211
- [34] Tatsiy Yu.G. *Ekologo-geokhimicheskaya otsenka zagryazneniya okruzhayushchey sredy v zone deystviya Karabashskogo medeplavil'nogo kombinata* [Ecological and geochemical evaluation of environmental pollution within the operating area of the Karabash copper-smelting plant]. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya i prirodopol'zovanie* [Tyumen State University Herald], 2012, no. 12, pp. 81–86.
- [35] Sinyavskiy I.V., Knyazeva T.G. *Tyazhelye metally v sisteme «pochva — rastenie — chelovek» v promyshlennykh gorodakh gornolesnoy zony Yuzhnogo Urala* [Heavy metals in the «soil — plant — human» system in industrial cities of the mountain-forest zone of the Southern Urals]. *Agroprodovol'stvennaya politika Rossii* [Agro-food policy in Russia], 2016, no. 4(52), pp. 59–62.
- [36] Linnik V.G., Khoroshavin V.Yu., Pologrudova O.A. *Degradatsiya prirodnykh landshaftov i khimicheskoe zagryaznenie v blizhney zone vliyaniya Karabashskogo medeplavil'nogo kombinata* [Degradation of natural landscapes and chemical pollution in the near zone of influence of the Karabash Copper Smelter]. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya i prirodopol'zovanie* [Tyumen State University Herald. Natural Resource Use and Ecology], 2013, no. 4, pp. 105–114.

Authors' information

Makhniova Svetlana Georgievna — Cand. Sci. (Biology), Associate Professor, Senior Researcher of the FGBUN Botanical Garden, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Associate Professor of the Department of Mathematical and Natural Science Disciplines of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Russian State Professional Pedagogical University», makhniovasg@mail.ru

Menshchikov Sergey Leonidovich — Dr. Sci. (Agriculture), Head Laboratory of Ecology of Technogenic Plant Communities, FGBUN Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, m.sergei1951@yandex.ru

Received 19.10.2020.

Accepted for publication 02.11.2020.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НИЗКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ И ГИДРОГЕЛЯ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ПРИЖИВАЕМОСТИ И РОСТА СЕЯНЦЕВ ЕЛИ ЕВРОПЕЙСКОЙ (*PICEA ABIES* L.)

А.И. Смирнов¹, Ф.С. Орлов¹, П.А. Аксенов², В.Ф. Никитин²

¹ООО «Разносервис», 127051, Москва, Лихов пер., д. 10

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

3642737@mail.ru

Отражены результаты исследований, проведенных в Сергиево-Посадском лесничестве Управления лесного хозяйства Московской обл. совместно с лабораторией кафедры лесных культур, селекции и дендрологии МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал). Продемонстрирована технология посадки саженцев ели европейской (*Picea abies* L.) в культуры, позволяющая существенно повысить приживаемость опытных образцов и улучшить их биометрические характеристики: высоту, диаметр корневой шейки, массу, а также оценить эффективность влияния обработки низкочастотным электромагнитным полем на морфометрические характеристики и анатомическое строение саженцев. Полученные результаты показали положительное влияние электромагнитного поля и гидрогеля на увеличение приживаемости опытных образцов саженцев ели европейской по отношению к контролю. Результаты сравнительного биометрического анализа подтвердили эффективность разработанных приемов обработки саженцев ели европейской.

Ключевые слова: низкочастотное электромагнитное поле, технология предпосевной обработки семян электромагнитным полем, гидрогель, саженцы ели европейской, морфометрия, гистометрия

Ссылка для цитирования: Смирнов А.И., Орлов Ф.С., Аксенов П.А., Никитин В.Ф. Использование низкочастотного электромагнитного поля и гидрогеля для увеличения приживаемости и роста саженцев ели европейской (*Picea abies* L.) // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 1. С. 45–52. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-45-52

В лесах европейской части России основным методом закладки лесных культур хвойных пород является посадка стандартных (2–3-летних сеянцев) с открытой корневой системой [1].

Процесс искусственного лесовосстановления в первую очередь основан на использовании качественного посадочного материала [2]. Одним из факторов, влияющих на успешность лесовосстановления, является высокая приживаемость сеянцев. В современной практике ведения лесного хозяйства при облесении вырубок часто не все стандартные и качественные сеянцы приживаются [3], поэтому для лесоводов необходимы технологии, которые способствуют лучшей приживаемости посадочного материала, не истощают пахотный слой почвы и не загрязняют ее [4].

Ель европейская (*Picea abies* L.) относится к основным лесобразующим породам и широко используется в искусственном лесовосстановлении. Исследования по улучшению приживаемости сеянцев этой древесной породы являются актуальными. Для обработки сеянцев, опираясь на опыт предыдущих исследований [5], использовали запатентованный низкочастотный генератор «Рост-Актив» [6] и технологию предпосевной обработки сеянцев электромагнитным полем (ПО-СЭП) [7], а также гидрогель — гранулированный полимерный абсорбент, который выполняет роль влагонакопителя и при внесении в почву удерживает

воду и растворенные в ней питательные вещества в зоне ризосферы растений, легко отдавая накопленную влагу растениям, что помогает сеянцам быстрее и лучше прижиться [8–10]. Для нашего исследования особый интерес представляет изучение эффективности этих способов для повышения приживаемости лесных культур.

Цель работы

Цель исследования — изучение влияния низкочастотного электромагнитного поля и внесения в почву гидрогеля на рост и приживаемость саженцев ели европейской.

Объекты и методы исследования

Исследование проводилось в период с 2015 по 2019 г. на территории Сергиево-Посадского участкового лесничества Сергиево-Посадского филиала ГКУ МО «Мособллес» и в лаборатории кафедры лесных культур, селекции и дендрологии МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал).

Объектами исследования служили семена ели европейской первого класса качества с действующим сертификатом, и 4-х-летние саженцы ели европейской с открытой корневой системой, выращенные из этих семян.

Весной 2015 г. в посевном отделении Сергиево-Посадского питомника подготовка поля для посева семян была осуществлена по системе

черного пара. Согласно методике исследования семена для опытов обрабатывали по технологии ПОСЭП с помощью низкочастотного генератора «Рост-Актив» с частотой 16 Гц при возрастающем значении индукции магнитного поля от 0,4 до 2,0 мТл и с экспозицией 11 мин. Контролем служили необработанные семена.

Были определены контрольные и опытные участки полей. Посевы проведены сеялкой СЛП 5-(4) по 5-строчной схеме на общей площади 2,21 га, глубина заделки семян 1,5 см, мульчирование посевов проводилось смесью торфа с песком и опилками. Всего высеяно 149 кг семян ели европейской — при норме высева 72 кг/га.

В течение вегетационного сезона проводились следующие агротехнические мероприятия по уходу за растениями: трехкратное рыхление в междурядьях с использованием культиватора КСР-2 в агрегате с МТЗ-52; в рядах двукратная ручная прополка с уборкой сорняков с поля; полив с применением мотопомпы.

Учет выхода однолетних сеянцев был проведен 2 сентября 2015 г.

В мае 2019 г. были заложены контрольные и опытные посадки саженцев ели европейской, отобранные в посевном отделении питомника.

На выделенном участке (кв. 20, выд. 7) Сергиево-Посадского участкового лесничества, подготовленного под посадки саженцев ели, лесокультурная площадь представляла собой вырубку 2018 г. площадью 0,4 га категории «б», с удовлетворительным состоянием очистки и средним задернением, где была проведена механизированная нарезка борозд, глубиной до 15 см, плугом ПКЛ-70.

7 мая 2019 г. на участке 360 погонных метров были подготовлены 9 посадочных гряд по 40 м каждая. Из питомника с контрольных и опытных участков полей был проведен рандомизированный отбор саженцев ели для посадки в культуры в количестве 450 сеянцев — 300 шт. для экспериментальных испытаний и 150 шт. для контроля [11].

В сравнительных опытах участвовали три варианта сеянцев:

- 1) контроль — сеянцы необработанные, 150 шт.;
- 2) опыт-1 — сеянцы из семян, обработанных электромагнитным полем весной 2015 г., 150 шт.;
- 3) опыт-2 — сеянцы из семян, обработанных электромагнитным полем весной 2015 г. и гидрогелем, 150 шт.

Ручная посадка саженцев ели европейской, с открытой корневой системой, проводилась под меч Колесова в трехкратной повторности в подготовленные борозды по 50 шт. В опыте-2 предварительно в посадочные лунки вносили гидрогель, набухший в воде (из расчета 2 г сухого гидрогеля на одну лунку), и затем высаживали сеянцы, обработанные электромагнитным полем.



Рис. 1. Саженцы ели европейской (сентябрь 2019 г): *а* — контроль; *б* — обработка электромагнитным полем; *в* — обработка электромагнитным полем и гидрогелем

Fig. 1. European spruce seedlings (September 2019): *a* — control; *b* — treatment by an electromagnetic field; *c* — treatment with an electromagnetic field and a hydrogel

В конце сентября 2019 г. был сделан учет прижившихся саженцев на опытных и контрольных участках и проведены их измерения (рис. 1).

Была проведена выкопка контрольных и опытных саженцев для детальных исследований в лаборатории кафедры лесных культур, селекции и дендрологии МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал). Выполнены измерения следующих биометрических показателей: высоты саженца, диаметра ствола саженца на уровне корневой шейки, массы корней и надземной части в воздушно-сухом состоянии после высушивания в течение 15 сут. и линейный прирост текущего года. Для определения средней массы частей саженцев использовались весы Аcom JW1. Замеры биометрических параметров саженцев проводились в количестве, достаточном для обеспечения точности среднестатистических показателей в пределах $\pm 5\%$.

Для проведения гистометрического анализа поперечных срезов использовали следующую методику. Из саженцев вырезали 1–2-сантиметровые участки стволиков с корневой шейкой, которые подвергали действию размягчающей спиртоглицериновой смеси (соотношение компонентов 1:1) в течение 10 сут. при температуре 25...30 °С. Далее получали поперечные срезы с помощью микротомы МС-2 и окрашивали в соответствии с общепринятой методикой [13]. Временные глицериновые препараты изготавливали в соответствии с методикой, изложенной в работе [14].

Микроскопирование велось в прямом светопольном и поляризационном режимах на исследовательском биологическом микроскопе Jenoval (Carl Zeiss), снабженном окуляр-микрометром и поляризаторами. Использовали микрообъективы: GF-Plan 3,2/0,06/∞/-, GF-Plan 12,5/0,25/∞/-, GF-Plan 25/0,5/∞/0,17, GF-Plan 40/0,65/∞/0,17, GF-Plan HI 100/1,25/160/0,17. Срезы ксилемы фотографировали с помощью микрофотонасадки. Измерение и подсчет структурных элементов годичных колец проводился согласно данным работы [12].

Для проверки достоверности полученных результатов руководствовались общепринятыми методиками статистической обработки [15–20] и с использованием программ Microsoft Excel.

Результаты и их обсуждение

Анализ приживаемости саженцев осенью 2019 г. показал значительное превосходство опытных вариантов над контролем (табл. 1).

Результаты исследований влияния электромагнитного поля и гидрогеля на приживаемость саженцев ели европейской, выращиваемых в открытом грунте питомника показали, что лучшим вариантом оказалась совместная обработка электромагнитным полем с добавлением гидрогеля при посадке (см. табл. 1). Наблюдаемую разницу в опыте-2 можно объяснить стимулирующим действием электромагнитного поля при длительном

Т а б л и ц а 1

Характеристика приживаемости сеянцев ели европейской, обработанных электромагнитным полем и гидрогелем (учет в сентябре 2019)
Characteristics of the survival rate of European spruce seedlings treated with an electromagnetic field and a hydrogel (accounting in September 2019)

Варианты опыта	Число учтенных саженцев при посадке	Число прижившихся саженцев	Приживаемость ± ошибка доли, %
Контроль	150	133	89 ± 2,6
Опыт-1	150	142	95 ± 1,8
Опыт-2	150	146	97 ± 1,4

протективном действии гидрогеля на последующий после пересадки ризогенез и поглощение растворов корнями в постстрессовый период. Также обработка электромагнитным полем совместно с добавлением гидрогеля оказали влияние на биометрические характеристики саженцев ели европейской (табл. 2).

По результатам осенних учетов проведено сравнение средних биометрических характеристик саженцев ели европейской в вариантах эксперимента: «Опыт-1», «Опыт-2» и «Контроль». Данные табл. 2 свидетельствуют о том, что в результате

Т а б л и ц а 2

Средние биометрические характеристики саженцев ели европейской, обработанных электромагнитным полем и гидрогелем, по Сергиево-Посадскому лесничеству (лесной питомник)

Average biometric characteristics of European spruce seedlings, treated with an electromagnetic field and hydrogel, in the Sergiev Posad forestry (forest nursery)

Варианты опыта	Диаметр корневой шейки, мм	Высота сеянца, см	Протяженность последнего линейного прироста осевого побега, см	Масса сухого растения, г	Масса сухих корней, г	Масса сухой надземной части без хвои, г	Масса сухой хвои, г
Контроль	4,3 ± 0,21	32,1 ± 1,61	5,1 ± 0,24	8,9 ± 0,23	1,65 ± 0,04	3,07 ± 0,13	4,25 ± 0,19
Относительно контроля, %	100	100	100	100	100	100	100
Опыт-1	5,6 ± 0,20	39,4 ± 1,99	5,8 ± 0,28	14,8 ± 0,62	2,83 ± 0,16	4,86 ± 0,27	6,95 ± 0,30
Относительно контроля, %	130,1	122,6	113,4	165,8	171,6	158,3	163,5
$t_{расч}$	4,48	2,85	1,9	8,92	7,15	5,97	7,60
Опыт-2	6,0 ± 0,27	42,1 ± 2,08	6,5 ± 0,22	15,8 ± 0,74	3,70 ± 0,18	5,43 ± 0,29	7,67 ± 0,21
Относительно контроля, %	139,6	131,2	128,1	177,9	224,2	176,8	180,5
$t_{расч}$	4,97	3,8	4,3	8,90	11,12	7,43	12,08

Примечание. Приведены средние арифметические значения биометрических характеристик саженцев ± ошибка средней арифметической; объемы сравниваемых выборок = 20 шт.; стандартное значение t -критерия достоверности различий ($t_{ст}$) = 2,024 при заданном уровне значимости (α) = 0,05; $t_{расч}$ — расчетный t -критерий достоверности различий между выборками; жирным шрифтом выделены значения $t_{расч}$, превышающие стандартное значение t -критерия.

Средние гистометрические характеристики вариантов опыта с саженцами ели европейской

Average histometric characteristics of experiments with European spruce seedlings

Варианты опыта	Гистометрический показатель	Год образования радиального прироста ксилемы					Среднее значение показателя за 5 лет ± ошибка средней арифметической	Среднее значение показателя за период с 2015 по 2017	
		2015	2016	2017	2018	2019		Фактическое значение ± ошибка средней арифметической	Относительно контроля, %
Контроль	ШГК, мм	0,16	0,37	0,55	0,43	0,24	0,351 ± 0,069	0,360 ± 0,113	100
	<i>n</i> , ряд ⁻¹	15	28	36	29	22	26,0 ± 3,5	26,3 ± 6,1	100
	<i>d</i> , мкм	10,7	13,2	15,2	14,6	10,9	12,92 ± 0,92	13,03 ± 1,30	100
Опыт-1	ШГК, мм	0,27	0,66	0,68	0,46	0,26	0,466 ± 0,090	0,537 ± 0,133	149
	<i>n</i> , ряд ⁻¹	23	46	43	28	18	31,6 ± 5,5	37,3 ± 7,2	142
	<i>d</i> , мкм	11,6	14,3	15,9	16,4	14,6	14,56 ± 0,84	13,93 ± 1,25	108
Опыт-2	ШГК, мм	0,26	0,64	0,69	0,45	0,44	0,496 ± 0,077	0,530 ± 0,136	147
	<i>n</i> , ряд ⁻¹	21	48	43	27	27	33,2 ± 5,2	37,3 ± 8,3	142
	<i>d</i> , мкм	12,2	13,3	16,2	16,8	16,2	14,94 ± 0,92	13,90 ± 1,19	107

Примечание. ШГК — ширина годичного кольца; *n* — число люменов трахеид в радиальном ряду годичного кольца; *d* — средний радиальный диаметр трахеиды; объемы выборок = по 10 саженцев на каждый вариант опыта.



Рис. 2. Изменение ширины годичных колец (ШГК) саженцев сравниваемых вариантов с 2015 по 2019 г.: 1 — контроль; 2 — опыт-1; 3 — опыт-2

Fig. 2. Change in the width of the annual rings (SGC) of the seedlings of the compared variants from 2015 to 2019: 1 — control; 2 — experiment-1; 3 — experience-2

обработки саженцев в опыте-2 учитываемые биометрические показатели превышают контрольные, к примеру, высота опытных сеянцев превосходила контроль на 31 %. Различия большинства средних показателей опытов достоверны на пятипроцентном и более высоких уровнях значимости.

В конце вегетационного сезона в лаборатории кафедры лесных культур, селекции и дендрологии МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), был проведен сравнительный гистометрический анализ поперечных срезов контрольных и опытных стволиков саженцев ели европейской (табл. 3).

По данным гистометрических исследований сделан вывод, что ширина годичного кольца у сравниваемых вариантов значительно варьирует независимо от обработки электромагнитным полем. По всей видимости, это связано с неоднородностью условий вегетационных периодов как по климатическим изменениям, так и по применяемым агротехническим приемам и уходам.

Более подробно изменчивость радиального прироста можно рассмотреть на гистограмме (рис. 2), отражающей изменчивость ширины годичных колец (ШГК) с 2015 по 2019 г.

Из рис. 2 видно, что уже в первый год жизни саженцы, полученные из семян обработанных электромагнитным полем по технологии ПОСЭП, обгоняют контрольные по ШГК. Существенных различий в размере годичного прироста ксилемы с 2015 по 2018 г. между опытными вариантами не наблюдали, так как оба варианта произрастают в одинаковых условиях с одинаковой первичной предпосевной обработкой. В 2016 и 2017 гг. проявилось существенное увеличение различий в приростах между опытными и контрольной группами. Наибольшая разница по величине радиального прироста видна в 2016 г. между контрольным вариантом и опытом-1 — 78 %. В 2018 г. различия между всеми сравниваемыми группами по ШГК были минимальны. Мы связываем наблюдаемые различия в ШГК между контрольными и опытными вариантами с действием предпосевной обработки на ростовые процессы саженцев. Потенциал



Рис. 3. Фрагмент поперечного микросреза стволика саженца ели европейской. Контрольный вариант эксперимента (объектив GF-Plan 12,5/0,25/∞/–, окраска генцианвиолетом)

Fig. 3. Fragment of a transverse micro-section of the stem of a European spruce seedling. Control variant of the experiment (lens GF-Plan 12,5/0,25/∞/–, stained with gentian violet)

действия обработки электромагнитным полем позволяет продуцировать саженцам более широкие кольца ксилемы на протяжении 3-х лет — с 2015 по 2017 г. К вегетационному сезону 2018 г. физиологические процессы, модифицированные электромагнитным полем, ослабевают, и ШГК опытных и контрольного варианта мало различаются. Необходимо отметить резкое превышение годовичного прироста в опыте-2, в котором дополнительно при посадке весной 2019 г. был использован гидрогель. Разница в ШГК между контрольным вариантом и опытом-2 к концу вегетации 2019 г. составляет более 80 %. По нашему мнению, наблюдаемое различие является следствием протективного действия гидрогеля на адаптацию корневой системы саженцев при пересадке весной 2019 г.

Для оценки влияния обработки электромагнитным полем на ксилогенез саженцев мы сравнили годовичные кольца различных вариантов эксперимента, образованные в первые три вегетационных сезона после обработки семян по технологии ПОСЭП. Параметры ксилемы опытных вариантов саженцев показывают различия за период 2015–2017 г. в ширине радиальных приростов, числе люменов трахеид в радиальном ряду, средних радиальных диаметрах трахеид и составляют соответственно более 45, 40 и 5 % относительно контрольного варианта (см. табл. 3). Наблюдается общая картина усиления процессов

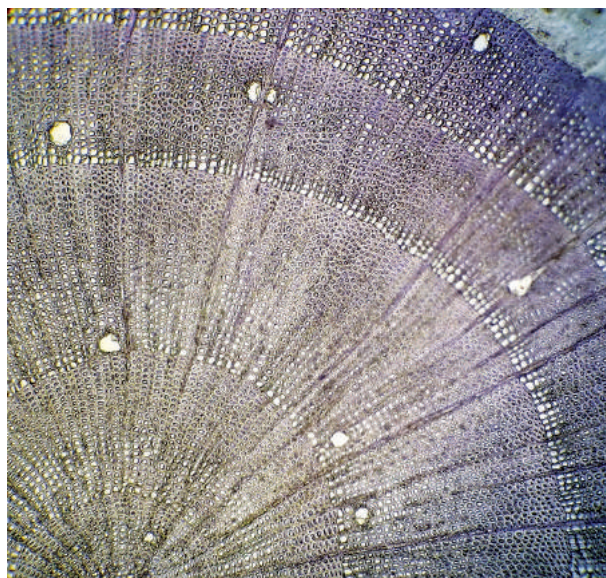


Рис. 4. Фрагмент годовичных колец на поперечном микросрезе стволика саженца ели европейской. Опыт-1. Видны наиболее широкие кольца, образовавшиеся в 2016, 2017 г. (объектив GF-Plan 12,5/0,25/∞/–, окраска генцианвиолетом)

Fig. 4. Fragment of annual rings on a transverse micro-section of the stem of a European spruce seedling. Experiment-1. The widest rings are visible, formed in 2016, 2017 (lens GF-Plan 12,5/0,25/∞/–, stained with gentian violet)

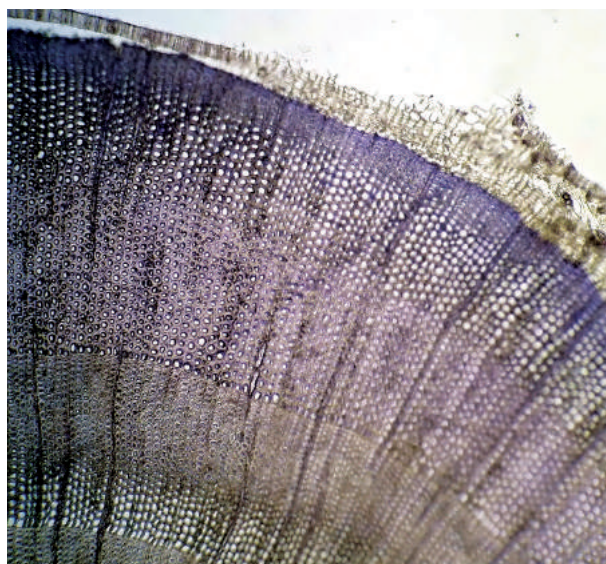


Рис. 5. Фрагмент последнего широкого годовичного кольца (2019 г.) поперечного микросреза стволика саженца ели европейской. Опыт-2 (объектив GF-Plan 12,5/0,25/∞/–, окраска генцианвиолетом)

Fig. 5. Fragment of the last wide annual ring (2019) of a transverse micro-section of the stem of a European spruce seedling. Experiment-2 (lens GF-Plan 12,5/0,25/∞/–, coloring with gentian violet)

ксилогенеза, выраженная в увеличение рассматриваемых гистометрических параметров древесины, образованной после электромагнитного воздействия.

Детальное микроскопирование поперечных срезов ксилемы исследуемых групп саженцев с использованием режимов частично скрещенных никелей выявило следующие особенности строения стеблей на уровне корневой шейки (рис. 3–5):

1) размер сердцевины сравниваемых групп в опытных вариантах превышает контроль на 10...25 %;

2) толщина клеточных стенок трахеид первых трех радиальных приростов ксилемы при обработке электромагнитным полем заметно больше по сравнению с контрольной группой (см. рис. 4);

3) упорядоченность сечений трахеид в радиальных рядах годовичных колец выше у вариантов с обработкой электромагнитным полем (см. рис. 4, 5);

4) границы колец ксилемы выражены более значительно при малом увеличении микроскопа у вариантов с обработкой электромагнитным полем;

5) годовичные кольца, образованные в 2019 г., по своей анатомической структуре очень близки к контрольному варианту и опыта-2, однако этот вариант, с применением гидрогеля, показал более крупные сечения трахеид в плоскости поперечного среза последнего годовичного кольца (см. рис. 5).

6) встречаемость вертикальных смоляных ходов на единицу площади поперечного среза заметно больше в срединных кольцах ксилемы вариантов саженцев после обработки электромагнитным полем (см. рис. 4).

Выводы

Результаты исследования, полученные при сравнении основных биометрических характеристик семян (саженцев): высоты, массы и диаметра корневой шейки, выращенных из семян, обработанных низкочастотным электромагнитным полем по технологии ПОСЭП отдельно и с применением гидрогеля, показали значительные превышения показателей опытных образцов по сравнению с контрольными. Использование технологии ПОСЭП и гидрогеля при посадке в культуры саженцев ели европейской позволило существенно повысить приживаемость опытных образцов и оказать влияние на ускорение ростовых процессов саженцев, обработанных низкочастотным электромагнитным полем.

Гистометрическое исследование показало эффективность влияния обработки электромагнитным полем по технологии ПОСЭП на улучшение анатомического строения саженцев ели европейской.

Таким образом, использование низкочастотного электромагнитного поля и гидрогеля при создании лесных культур является принципиально новым и перспективным направлением, способным решать задачи развития лесного хозяйства РФ.

Список литературы

- [1] Рекомендации по восстановлению искусственным и комбинированным способами хвойных и твердолиственных молодняков на землях лесного фонда (с базовыми технологическими картами на выполненные работы). Пушкино: ВНИИЛМ, 2015. 80 с.
- [2] Луганский Н.А., Залесов С.В., Азаренок В.А. Лесоводство. Екатеринбург: УГЛТА, 2001. 320 с.
- [3] ГОСТ 17.5.3.04–83 Охрана природы (ССОП). Земли. Общие требования к рекультивации земель (с Изменением № 1). URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200003393> (дата обращения 21.08.2020).
- [4] Romanas L. Effect of cold stratification on the germination of seeds // Physiology of forest seeds. The National Agricultural Research Foundation (NAGREF). Thessaloniki, Greece: Forest Research Institute, 1991, p. 20.
- [5] Смирнов А.И. Влияние низкочастотного электромагнитного поля на всхожесть семян и рост сеянцев сосны обыкновенной в питомниках зоны смешанных лесов: дис. ... канд. с.-х. наук. М., МГУЛ, 2016.
- [6] Смирнов А.И., Орлов Ф.С. Способ предпосевной обработки семян и устройство для его осуществления. Пат. № 2591969 РФ, заявитель и патентообладатель ООО «Разносервис», 2014. Бюл. № 20.
- [7] Смирнов А.И., Орлов Ф.С. Устройство для предпосевной обработки посевного материала. Пат. № 155132 РФ, заявитель и патентообладатель ООО «Разносервис», 2014. Бюл. № 26.
- [8] Sarvaš M, Pavlenda P., Takáčová E. Effect of hydrogel application on survival and growth of pine seedlings in reclamations // Journal of forest science, 2007, v. 53 (5), pp. 204–209.
- [9] Jayant R. Row Conserving Water with Agricultural Hydrogels. URL: <http://www.brighthubengineering.com/hydraulics-civil-engineering/76522-conserving-water-with-agricultural-hydrogels/> (дата обращения 21.08.2020).
- [10] Мырзаханова М.Н., Кушкумбаева А.А. Инновационные возможности поддержания почвенного баланса различных сельскохозяйственных культур // Problems of fighting human and animal diseases in terms of the biosphere conditions deterioration London, 23–29 марта 2016 г., Лондон: Междунар. академия наук и высшего образования, 2016. С. 14–16.
- [11] ГОСТ 3317–90 Сеянцы деревьев и кустарников. Технические условия. URL: https://allgosts.ru/65/020/gost_3317-90 (дата обращения 21.08.2020).
- [12] Ваганов Е.А., Шашкин А.В., Сви́дерская И.В., Высоцкая Л.Г. Гистометрический анализ роста древесных растений. Новосибирск: Наука, 1985. 108 с.
- [13] De Lucas M., Etchells J.P. (Eds.) Xylem – Methods and Protocols. New York: Publishing Humana Press, 2017, p. 260.
- [14] Schweingruber F.H. Wood Structure and Environment (Springer Series in Wood Science). Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2007, p 280
- [15] Свалов Н.Н. Вариационная статистика. М.: МГУЛ, 2001. С. 80.
- [16] Willan R.L. A Guide to Forest Seed Handling with Special Reference to the Tropics. FAO, Rome: Forestry Paper, 1987, no. 20/2. URL: <http://www.fao.org/3/ad232e/AD232E10.htm#fig9.20> (дата обращения 21.08.2020).
- [17] De Souza Torres A., Garcia D., Sueiro L., Licea L., Porras E. Pre-sowing magnetic treatment of tomato seeds effect on the growth and yield of plants cultivated late in the season // Spanish J. Agricultural Research, 2005, no. 3(1), pp. 113–122.

- [18] Mahajan T.S., Pandey O.P. Effect of electric and magnetic treatments on germination of bitter melon (*Momordica charantia*) seed // *International J. Agriculture and Biology*, 2015, no. 17 (2). URL: https://fspublishers.org/published_papers/47334_.pdf (дата обращения 21.08.2020).
- [19] Get transplanting right for seedling survival. Lloyd Phillips, September 11, 2012. URL: <https://www.farmersweekly.co.za/agri-technology/farming-for-tomorrow/get-transplanting-right-for-seedling-survival/> (дата обращения 21.08.2020).
- [20] Gordon G.A. Seed manual for forest trees. UK London: Forestry Commission, 1992, 132 p.

Сведения об авторах

Смирнов Алексей Иванович — канд. с.-х. наук, ООО «Разносервис», 3642737@mail.ru

Орлов Федор Станиславович — канд. с.-х. наук, ООО «Разносервис», ar-6@yandex.ru

Аксенов Петр Андреевич — канд. с.-х. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), akenov.pa@mail.ru

Никитин Владимир Федорович — канд. с.-х. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), forestmaster@yandex.ru

Поступила в редакцию 06.10.2020.

Принята к публикации 16.11.2020.

LOW-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELD AND HYDROGEL TO INCREASE SURVIVAL RATE AND GROWTH OF EUROPEAN SPRUCE (*PICEA ABIES* L.) SEEDLINGS

A.I. Smirnov¹, F.S. Orlov¹, P.A. Aksenov², V.F. Nikitin²

¹LLC Raznoservice, 10, Likhov per., 127051, Moscow, Russia

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

3642737@mail.ru

This paper presents the results of a study that was conducted in the Sergiev Posad forestry of the Moscow region forestry Department with the participation of the laboratory of the Department of Forest crops, breeding and dendrology of the BMSTU (Mytishchi branch). This study shows the technology of planting European (*Picea abies* L.), seedlings in culture, which can significantly increase the survival rate of experimental samples and improve their biometric characteristics: height, diameter of the root neck, weight, and also the anatomical structure of seedlings. The experiments were performed using a low-frequency generator «Rost-Active», the author's technology pre-sowing treatment of seeds and seedlings by an electromagnetic field, hydrogel (polymer water-retaining agent) and a method of histometric analysis of cross sections of control and experimental stems of European spruce seedlings. The results of the study indicate a clear positive effect of electromagnetic field and hydrogel on the increase in survival of experimental samples of seedlings of common European spruce in relation to the control. Also, the results of comparative histometric analysis indicate the effectiveness of methods for treating pine seedlings with low-frequency EMF and applying hydrogel to the soil.

Keywords: low frequency electromagnetic field, technology pre-sowing treatment of seeds and seedlings by an electromagnetic field, hydrogel, seedlings of European spruce, morphometry, histometry

Suggested citation: Smirnov A.I., Orlov F.S., Aksenov P.A., Nikitin V.F. *Ispol'zovanie nizkochastotnogo elektromagnitnogo polya i gidrogelya dlya uvelicheniya prizhivaemosti i rosta seyantsev eli evropeyskoy (Picea abies L.)* [Low-frequency electromagnetic field and hydrogel to increase survival rate and growth of European spruce (*Picea abies* L.) seedlings]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 1, pp. 45–52.

DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-45-52

References

- [1] *Rekomendatsii po vosstanovleniyu iskusstvennykh i kombinirovannykh sposobami khvoynnykh i tverdolistvennykh molodnyakov na zemlyakh lesnogo fonda (s bazovymi tekhnologicheskimi kartami na vypolnenie rabot)* [Recommendations for the restoration by artificial and combined methods of coniferous and hard-leaved young stands on the lands of the forest fund (with basic technological maps for work performance)]. Pushkino: VNIILM, 2015, 80 p.
- [2] Lugansky N.A. *Lesovodstvo* [Forestry]. Yekaterinburg: UGLTA, 2001, 320 p.
- [3] *GOST 17.5.3.04–83 Okhrana prirody (SSOP). Zemli. Obshchie trebovaniya k rekul'tivatsii zemel' (s Izmeneniyem № 1)* [Nature Conservation (SSOP). Earth. General requirements for land reclamation (with Amendment No. 1)]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200003393> (accessed 21.08.2020).
- [4] Romanas L. Effect of cold stratification on the germination of seeds. *Physiology of forest seeds*. The National Agricultural Research Foundation (NAGREF). Thessaloniki, Greece: Forest Research Institute, 1991, p. 20.

- [5] Smirnov A.I. *Vliyanie nizkochastotnogo elektromagnitnogo polya na vskhozhest' semyan i rost seyantsev sosny obyknovvennoy v pitomnikakh zony smeshannykh lesov* [Influence of low-frequency electromagnetic field on seed germination and growth of Scots pine seedlings in nurseries of mixed forest zone]. Diss. Cand. Sci. (Agric.). Moscow: MGUL, 2016.
- [6] Smirnov A.I., Orlov F.S. *Sposob predposevnoy obrabotki semyan i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [The method of presowing treatment of seeds and a device for its implementation]. Pat. 2591969 of the Russian Federation, applicant and patent holder of LLC Raznoservice, 2014, byul. no. 20.
- [7] Smirnov A.I., Orlov F.S. *Ustroystvo dlya predposevnoy obrabotki posevnogo materiala* [Device for pre-sowing treatment of seed]. Pat. 155132 RF, applicant and patent holder LLC Raznoservice, 2014, byul. no. 26.
- [8] Sarvaš M., Pavlenda P., Takáčová E. Effect of hydrogel application on survival and growth of pine seedlings in reclamations. *J. of forest science*, 2007, v. 53 (5), pp. 204–209.
- [9] Jayant R. Row Conserving Water with Agricultural Hydrogels. Available at: <http://www.brighthubengineering.com/hydraulics-civil-engineering/76522-conserving-water-with-agricultural-hydrogels/> (accessed 21.08.2020).
- [10] Myrzakhanova M.N., Kushkumbaeva A.A. *Innovatsionnye vozmozhnosti podderzhaniya pochvennogo balansa razlichnykh sel'skokhozyaystvennykh kul'tur* [Innovative possibilities of maintaining the soil balance of various agricultural crops]. Problems of fighting human and animal diseases in terms of the biosphere conditions deterioration, London, 23–29 March 2016 g. London: International Academy of Sciences and Higher Education, 2016, pp. 14–16.
- [11] *GOST 3317–90 Seyantsy derev'ev i kustarnikov. Tekhnicheskie usloviya* [Seedlings of trees and shrubs. Technical conditions]. Available at: https://allgosts.ru/65/020/gost_3317-90.
- [12] Vaganov E.A., Shashkin A.V., Sviderskaya I.V., Vysotskaya L.G. *Gistometricheskii analiz rosta drevesnykh rastenii* [Histometric analysis of the growth of woody plants]. Novosibirsk: Nauka, 1985, 108 p.
- [13] De Lucas M., Etchells J.P. (Eds.) *Xylem – Methods and Protocols*. New York: Publishing Humana Press, 2017, p. 260.
- [14] Schweingruber F.H. *Wood Structure and Environment* (Springer Series in Wood Science). Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2007, p 280
- [15] Svalov N.N. *Variatsionnaya statistika* [Variational statistics]. Moscow: MGUL, 2001, p. 80.
- [16] Willan R.L. *A Guide to Forest Seed Handling with Special Reference to the Tropics*. FAO, Rome: Forestry Paper, 1987, no. 20/2. Available at: <http://www.fao.org/3/ad232e/AD232E10.htm#fig9.20> (accessed 21.08.2020).
- [17] De Souza Torres A., Garcia D., Sueiro L., Licea L., Porras E. Pre-sowing magnetic treatment of tomato seeds effect on the growth and yield of plants cultivated late in the season. *Spanish J. Agricultural Research*, 2005, no. 3(1), pp. 113–122.
- [18] Mahajan T.S., Pandey O.P. Effect of electric and magnetic treatments on germination of bitter gourd (*Momordica charantia*) seed. *International J. Agriculture and Biology*, 2015, no. 17 (2). Available at: https://fspublishers.org/published_papers/47334_.pdf (accessed 21.08.2020).
- [19] Get transplanting right for seedling survival. Lloyd Phillips, September 11, 2012. Available at: <https://www.farmersweekly.co.za/agri-technology/farming-for-tomorrow/get-transplanting-right-for-seedling-survival/> (accessed 21.08.2020).
- [20] Gordon G.A. *Seed manual for forest trees*. UK London: Forestry Commission, 1992, 132 p.

Authors' information

Smirnov Aleksey Ivanovich — Cand. Sci. (Agriculture), LLC «Raznoservis», 3642737@mail.ru

Orlov Fedor Stanislavovich — Cand. Sci. (Agriculture), LLC «Raznoservis», ap-6@yandex.ru

Aksenov Petr Andreevich — Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), axenov.pa@mail.ru

Nikitin Vladimir Fedorovich — Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), forestmaster@yandex.ru

Received 06.10.2020.

Accepted for publication 16.11.2020.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЧВОПОКРОВНЫХ РАСТЕНИЙ В ЦЕЛЯХ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НА ОБЪЕКТАХ ЛАНДШАФТНОЙ АРХИТЕКТУРЫ

И.Ю. Бочкова¹, Ю.А. Хохлачева²

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

²ФГБУН «Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина Российской академии наук» (ГБС РАН), 127276, Москва, Ботаническая ул., д. 4

frog-flower@yandex.ru

Представлены результаты работы по отбору почвопокровных растений (как светолюбивых, так и теневыносливых), перспективных и очень перспективных для использования на объектах ландшафтной архитектуры. Работа велась в течение 2018 г. на базе коллекционного фонда лаборатории декоративных растений Главного ботанического сада (ГБС РАН), на двух опытных площадках, расположенных на основной территории ГБС РАН, — в коллекции-экспозиции «Теневой сад» и на экспозиционном участке «Декоративные многолетники». Всего в ходе исследования было отобрано 225 растений. На протяжении вегетационного периода систематически выполнялись натурные обследования опытных образцов и велись фенологические наблюдения. Натурные исследования заключались в биометрических измерениях высоты куста и цветоноса, диаметра куста, диаметра/длины цветка/соцветия, а также в уточнении окраски цветков/соцветий (посредством специальной цветовой шкалы Английского Королевского общества цветоводов (RHS Colour Chart)). Результатом данной работы является список, включающий в себя 40 наименований. Это очень перспективные и перспективные виды, которые рекомендованы к использованию в городском озеленении.

Ключевые слова: цветочное оформление, многолетники, почвопокровные, озеленение города

Ссылка для цитирования: Бочкова И.Ю., Хохлачева Ю.А. Исследование почвопокровных растений в целях их использования на объектах ландшафтной архитектуры // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 1. С. 53–63. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-53-63

В связи с рациональным использованием природных ресурсов на передний план выдвигается задача их эффективной эксплуатации и воспроизводства. Значительный удельный вес в системе природных ресурсов приходится на растительный покров как ярус растительности, имеющий чрезвычайно большое значение в формировании биоценоза. В зеленых насаждениях напочвенный покров играет не только декоративную роль, но и оздоровительную [1].

Почвопокровные растения — группа растений, которые вследствие семенного и вегетативного размножения, а также биологической способности к разрастанию со временем образуют плотный покров в виде подушек, ковров [2]. Это, преимущественно, неприхотливые, быстро разрастающиеся в горизонтальном направлении декоративные культуры. Они не требуют специального ухода, способствуют сохранению влаги в грунте, не допускают вымывания полезных веществ, препятствуют образованию сухой корки на поверхности земли, а в период вегетации выделяют кислород, их ассортимент богат и разнообразен. Такие растения можно использовать на тех территориях объектов ландшафтной архитектуры, на которых газон из злаковых трав по тем или иным причинам расти не может (например, под кронами деревьев). Несмотря на преимущества, они слабо внедрены в городское озеленение.

Использование искусственно созданного напочвенного покрова (как на открытых местах, так и под пологом древостоя) — важная задача. Зачастую на объектах ландшафтной архитектуры складываются такие условия, при которых злаковый газон в связи со своими биологическими особенностями не может нормально произрастать [3]. Поэтому для озеленения таких участков перспективно использование почвопокровных растений, ассортимент которых богат и разнообразен.

Цель работы

Цель данной работы — отбор почвопокровных растений (как теневыносливых, так и светолюбивых), которые окажутся перспективными и очень перспективными для городского озеленения, поскольку по причине малоизученности и недостаточности внедрения ассортимента предлагаемых растений в практику тема относится к актуальным.

Материалы и методы

Изучение декоративных и хозяйственноценных качеств почвопокровных растений проводилось на базе лаборатории декоративных растений Главного ботанического сада им. Н.В. Цицина РАН, чьи коллекционные фонды являются одними из крупнейших в Европе и насчитывают свыше 5800 наименований растений, в том числе 1000 видов и разновидностей и почти 4900 сортов

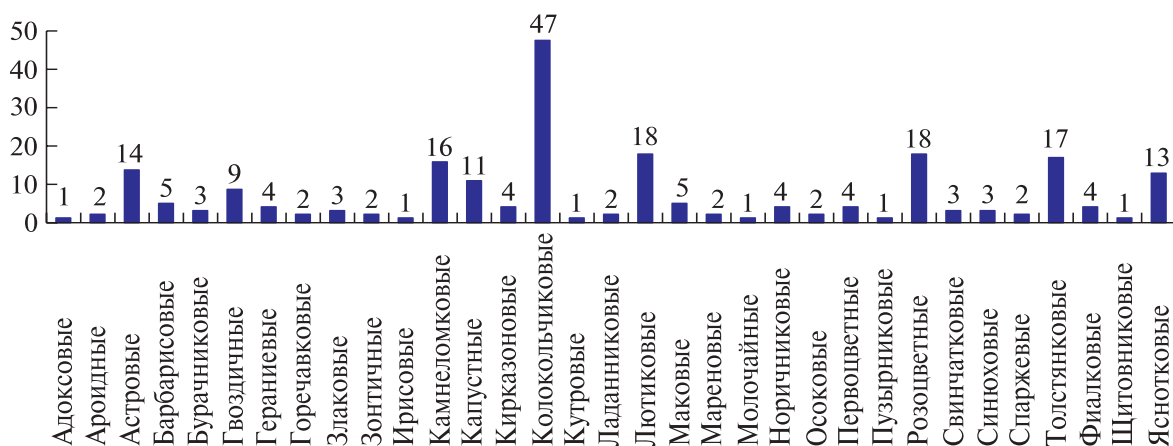


Рис. 1. Распределение растений по семействам
Fig. 1. Distribution of plants by family

и садовых форм [4]. Всего в ходе исследования было отобрано 225 природных видов почвопокровных растений (как светолюбивых, так и теневыносливых) [5–7].

Исследования проводились в 2018 г. на двух опытных площадках, расположенных на основной территории Главного ботанического сада, — в коллекции-экспозиции «Теневой сад» и на экспозиционном участке «Декоративные многолетники».

На протяжении всего вегетационного периода по 2 раза в неделю выполнялись натурные обследования опытных образцов и велись фенологические наблюдения [8, 9].

Натурные исследования заключались в биометрических измерениях высоты куста и цветоноса, диаметра куста, диаметра/длины цветка/соцветия, а также в уточнении окраски цветков/соцветий [10]. Биометрические измерения осуществлялись с помощью линейки, с точностью до 0,1 см. Окраска цветка/соцветия определялась посредством специальной цветовой шкалы Английского Королевского общества цветоводов (RHS Colour Chart).

Фенологические наблюдения были систематическими, их результаты зафиксированы в журнале в виде фенологической формулы, характеризующей состояние вегетативных и генеративных органов изучаемого растения [11]. В фенологическом журнале указаны дата начала фенофазы, а также следующие данные: М — повреждение растений весенними или осенними заморозками; Р — появление надземных органов вегетативного возобновления (усов, корневых отпрысков); С — появление самосева.

На основании полученных при проведении камеральной обработки данных установлены следующие характеристики.

Длительность вегетации — это время жизнедеятельности растений от V^1 (посев, посадка,

начало отрастания) до J^2 (начало отмирания листьев). У растений с зимующими листьями границами периода вегетации условно приняты даты схода и появления снежного покрова. Феноритм-тип определялся сроками жизни надземной части растения (V^1 – J^2). Длительность цветения — это период времени между Π^1 (начало бутонизации) и Π^2 (массовое цветение) [12].

Результаты и обсуждение

По результатам исследования изучаемые растения нами были распределены по различным группам. На рис. 1 показано распределение изучаемых растений по их принадлежности к семействам.

Анализ принадлежности растений к разным семействам показал, что наиболее многочисленно семейство колокольчиковые — 20,89 %; лютиковые и розоцветные — 8 %; толстянковые — 7,56 %, камнеломковые — 7,11 %, сложноцветные — 6,22 %, яснотковые — 5,78 %; меньше всего представителей семейств адоковые, ирисовые, кутровые, молочайные, пузырниковые и щитовниковые — 0,44 %.

В результате изучения распределения растений по местам естественного обитания анализ полученных данных показал (рис. 2), что родиной наибольшего числа растений являются Европа (45,8 %) и Кавказ (14,33 %). Примерно одинаковое количество растений обнаружено в Азии (10,03 %), Северной Америке (9,31 %) и на Дальнем Востоке (8,6 %). В Сибири найдено 5,01 % представителей этой группы растений. Самые незначительные показатели приходятся на Южную Америку, Новую Зеландию (по 1,43 %) и Африку (0,35 %).

По представленным данным можно сделать вывод, что наибольшее количество (почти половина) всех исследуемых почвопокровных видов растений произрастают на территории Европы.

Они перспективны и очень перспективны для выращивания в условиях средней полосы России.

Существуют разные способы создания цветников, в зависимости от желаемого акцента — на цвет, форму, структуру посадок, форму (тип) соцветий. Наиболее заметны такие типы соцветий, как метелка, щиток, корзинка. Менее заметны — головка, зонтик, кисть, самые малозаметные — колос, мутовка. Растения с вертикальной формой соцветий в первую очередь привлекают внимание зрителя. Зонтики — статичная форма, они удерживают взгляд в горизонтальной плоскости. Метелки хороши рядом и с одними, и с другими [13].

Наибольшее число растений (рис. 3) имеет тип соцветия метелку (28 %), более заметную в цветочных композициях. Наименьшее число растений имеют типы соцветия (менее 5 %) початок, полужонтик, мутовка.

Контраст — одно из важнейших средств композиции, позволяющее усилить выразительность противопоставленных объектов [14]. Хорошо выглядят композиции, основанные на разных формах соцветий. Возможны и такие варианты цветников, в которых растения представлены во всем разнообразии форм соцветий, но в этом случае важно соблюсти меру, чтобы не перенасытить композицию декоративными элементами. Если в цветнике акцент сделан на контраст, например, по форме соцветия, желательно уравновесить ее по окраске.

Наиболее заметны в цветниках, к примеру, гравилат чилийский и тиарка сердцелистная (метелка), прострел раскрытый (корзинка), флокс растопыренный и очиток гибридный (щиток), различные виды колокольчиков (метелка). Менее всего заметны соцветия у яснотки пятнистой (мутовка), зеленчука желтого (колос) и осоки ржавопятнистой (колос).

У наибольшего количества растений, как следует из рис. 4, цветки имеют белую окраску (23 %). Наиболее редко встречающиеся окраски — оранжевая (0,8 %) и двуцветная (0,8 %).

Из представленных данных можно сделать вывод о том, что многие природные виды имеют широкую вариабельность окраски цветов [15], и при правильном подборе растений можно обеспечить непрерывную смену цветения одних растений на другие с ранней весны и до глубокой осени, создавая неповторимую картину цветочных композиций.

Такие яркие окраски, как желтая, красная, оранжевая, лучше смотрятся на открытых солнечных местах. Пастельные окраски — лимонные, розовые, фиолетовые, голубые — лучше смотрятся в полутени. Белые соцветия, как правило, лучше смотрятся в тени [16].

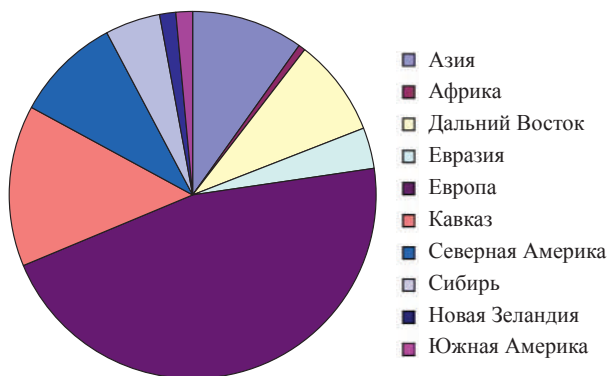


Рис. 2. Распределение растений по месту произрастания
Fig. 2. Distribution of plants at place of growth

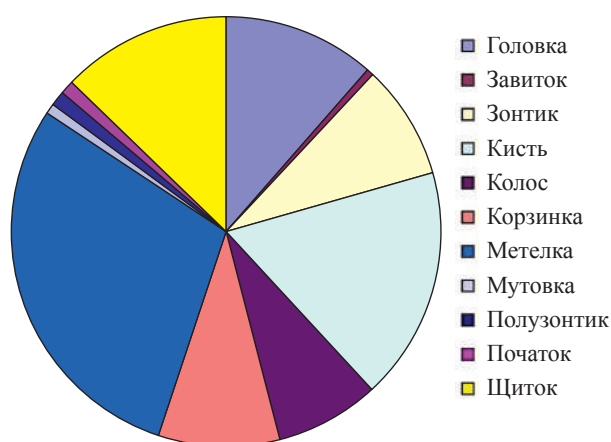


Рис. 3. Распределение растений по типу соцветий
Fig. 3. Distribution of plants by type of inflorescences

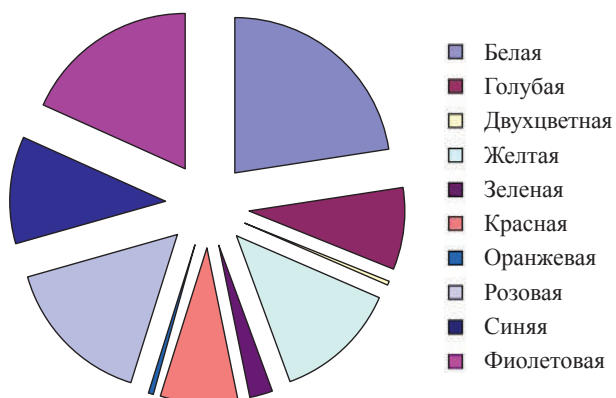


Рис. 4. Распределение растений по окраске соцветий
Fig. 4. Distribution of plants according to the color of inflorescence

Таким образом, пупавку красивую, очиток курильский, лапчатку крупноцветковую, гравилат чилийский, солнцезвезд гибридный, гвоздику травянку рекомендуется высаживать на солнечных местах, камнеломку Арендса, герань Эндриса, пупочник весенний, печеночницу трансильванскую — в условиях полутени. А камнеломка метельчатая, анемона дубравная, ясменник душистый ярко будут выделяться даже в тени.

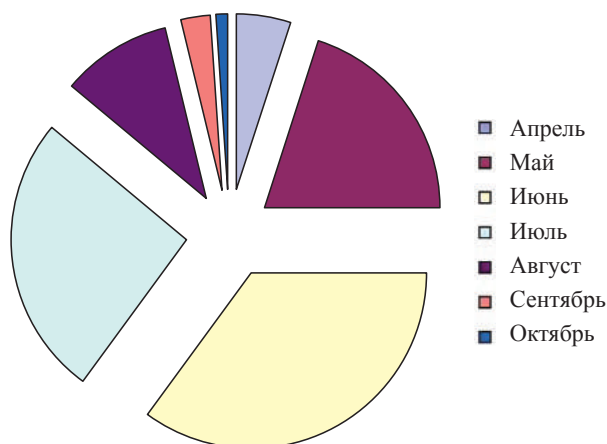


Рис. 5. Распределение растений по сроку цветения
Fig. 5. Distribution of plants in terms of flowering

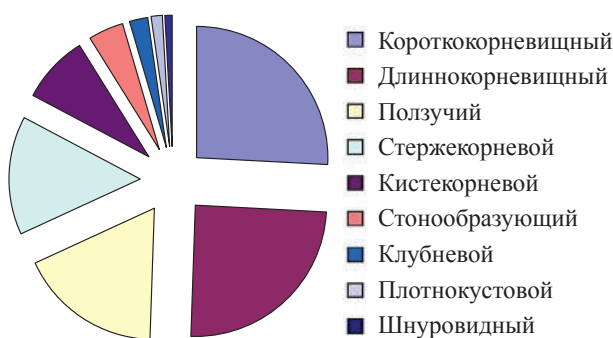


Рис. 6. Распределение растений по типу корневой системы
Fig. 6. Distribution of plants by type of root system

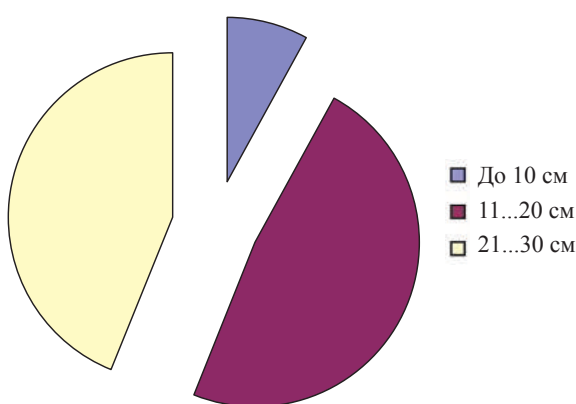


Рис. 7. Распределение растений по высоте
Fig. 7. Distribution of plants by height

Фенологические наблюдения необходимы для определения сроков цветения. За вегетационный период (с апреля по октябрь) наибольший процент (рис. 5) цветения рассматриваемых растений приходится на июнь (35%), июль (26%) и май-июнь (36,8%). В апреле на первоцветы приходится 5%, в мае число цветущих растений увеличивается до 20%. В самом конце сезона, в августе, цветут 10%, а в сентябре-октябре рас-

пускаются 4% растений. Самые долгоцветущие виды, которые цветут в течение всего периода — с мая по сентябрь и с мая по октябрь, составляют по 0,9% общего количества видов.

Из представленных данных можно сделать вывод о том, что у наибольшего количества почвопокровных растений начало цветения наблюдается в середине лета или даже в конце весны — начале лета. А учитывая то, что большинство почвопокровных многолетников — это растения, которые цветут все лето, достоинства их увеличиваются многократно.

В зависимости от происхождения все почвопокровные можно условно подразделить на две группы [17]: 1) уроженцы скальных склонов и высокогорных лугов, им необходимо открытое солнечное и сухое местоположение, а также бедные, известковые почвы; 2) в природе растут в подлеске, образуя растительный покров под деревьями и кустарниками, хорошо переносят разреженную тень и полутень, любят большую увлажненность [18].

Независимо от происхождения большинство почвопокровных растений имеют поверхностную корневую систему (рис. 6), поэтому для них не требуются глубокий плодородный слой и тщательная подготовка почвы [19], так как и в природе они растут в экстремальных условиях (особенно представители первой группы).

Главная отличительная особенность всех почвопокровных растений — их способность активно разрастаться, независимо от типа корневой системы. Кроме того, их можно по-разному использовать для оформления объектов ландшафтной архитектуры. Виды родом из лесов — барвинки (ползучий), фиалки (короткокорневищный), тиареллы (ползучий) — прекрасные компаньоны для деревьев с поверхностными корнями. Их используют при оформлении приствольных кругов. В тени хорошо развиваются различные герани (короткокорневищный), василистник (короткокорневищный), бадан (длиннокорневищный), которые в естественной среде приспособлены к таким условиям.

Если необходимо создать плотную дернину, можно использовать такие виды почвопокровных растений, как камнеломки (кистекокорневой), гейхеры (короткокорневищный), армерию (стержнекорневой), очитки (ползучий).

Есть растения, образующие плотную, долгоцветущую подушку, сплошь покрытую цветками — это обриета (стержнекорневой), армерия (стержнекорневой), флокс шиловидный (ползучий).

Растения высотой 21...30 см составляют 47,55%; от 11 до 20 см — 44% и самое незначительное количество приходится на растения высотой до 10 см — 8,44% (рис. 7).

Чаще всего к почвопокровным растениям относят низкорослые виды и стелющиеся по поверхности. Иногда используются и более высокие виды для заполнения пространств, обозреваемых с удаления, склонов или низин и для создания ярусности в оформлении.

У низкорослых почвопокровных растений, плотно прилегающих к земле, высота может значительно изменяться в период цветения [20]. Некоторые из них выпускают тонкие и довольно высокие цветоносы, в частности многие камнеломки, гейхеры, арабис, гвоздики.

Семенами размножаются 22,66 % растений, вегетативно — 20,44 %, а число видов, сочетающих оба типа размножения, составляют большинство — 56,9 %, что значительно увеличивает их шансы на распространение и выживаемость (рис. 8).

Семенное размножение относится к половому типу размножения, вегетативное — к бесполому и основано на способности организмов восстанавливаться полностью из какой-либо одной части [21].

Если рассматривать внедрение почвопокровных растений в культуру и их использование на объектах ландшафтной архитектуры, то очень важно в питомниках и цветочных хозяйствах усовершенствовать технологию выращивания этих растений в достаточном для нужд города количестве. На производстве (в питомниках, цветочных хозяйствах) отдают предпочтение размножению семенами по причине экономической обоснованности. Вегетативное размножение растений значительно дороже, потому что требуются большой объем ручного труда и определенный уход, на что затрачивается больше сил, времени и средств. Тогда как из 1 г семян прорастает много растений. Наиболее технологичными растениями считают те, которые хорошо размножаются и семенами, и вегетативно.

Светолюбивые растения составляют большинство — 53,14 %, полутеневыносливые — 33,21 %, а наименьшее количество приходится на теневыносливые — 13,63 % (рис. 9).

На основании полученных результатов, можно сделать вывод о том, что данные виды можно успешно применять в оформлении открытых пространств, в качестве декоративного оформления парков, скверов, садов в условиях недостаточной освещенности.

Количество видов, предпочитающих плодородные почвы, составляет 36,28 %, малоплодородные — 28,31 %, среднеплодородные — 35,39 % (рис. 10).

По отношению к плодородию почвы растения распределены примерно одинаково, что дает возможность широкого выбора декоративных травянистых растений для составления самых разнообразных цветников, практически в любых условиях.

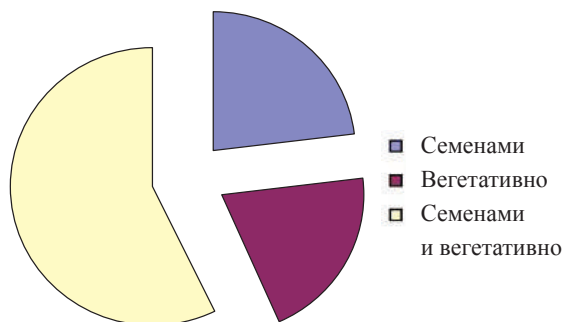


Рис. 8. Распределение растений по способу размножения
Fig. 8. Distribution of plants by propagation method

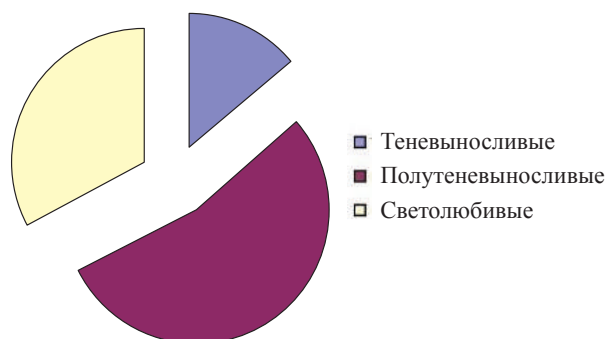


Рис. 9. Распределение растений по требованиям к световому режиму
Fig. 9. Distribution of plants by lighting requirements

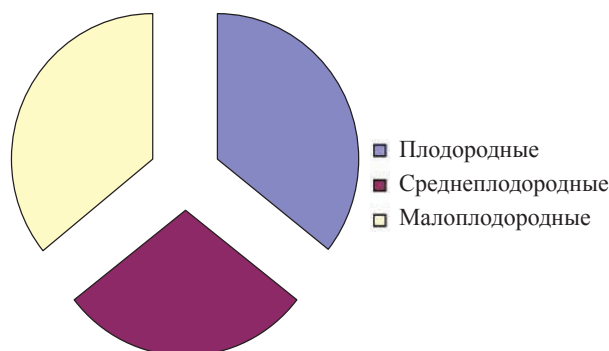


Рис. 10. Распределение растений по требованиям к плодородию почвы
Fig. 10. Distribution of plants according to the requirements to soil fertility

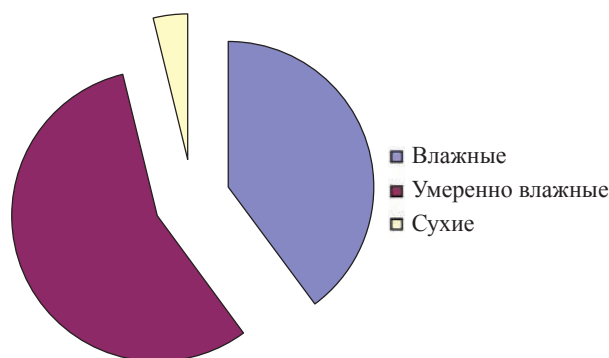


Рис. 11. Распределение растений по требованиям к увлажнению почвы
Fig. 11. Distribution of plants by soil moisture requirements

Наибольшее количество растений предпочитает умеренно увлажненные почвы — 55,65 %, влажные почвы подходят для 40 % растений, а самое меньшее число видов предпочитают сухие почвы — 4,34 % (рис. 11).

После анализа требований исследуемых растений к различным экологическим условиям была предпринята попытка распределить изучаемые растения по группам в зависимости от сочетания трех важнейших экологических факторов: световых условий, отношения к плодородию

почвы и ее влажности. Таким образом, в результате проведенных исследований были разработаны рекомендации по использованию растений в различных экологических условиях.

На основе проведенных исследований 225 видов декоративных почвопокровных растений был предложен список, включающий в себя 40 наименований (таблица). Это очень перспективные и перспективные виды, которые можно рекомендовать к использованию в городском озеленении.

Список перспективных и очень перспективных почвопокровных растений, рекомендуемых для введения в городское озеленение

List of promising and very promising ground cover plants, recommended for an introduction to urban landscaping

Но-мер п/п	Наименование	Высота, см	Родина	Тип разрастания	Время вегетации, месяц года	Время цветения, месяц года	Способ размножения	Перспективность	Окраска соцветий
Тенелюбивые и теневыносливые растения									
1	Барвинок травянистый (<i>Vinca herbacea</i> Waldst. et Kit.)	30	Луга Крыма, Кавказа	Ползучий	IV–X	VI	Вегетативное	Перспективный	Синие
2	Копытень канадский (<i>Asarum canadense</i> L.)	25	Леса Северной Америки	Короткокорневищный	V–IX	V	Семенами	«—»	Пурпурные
3	Копытень промежуточный (<i>A. intermedium</i> (C.A. Mey.) Grossh.)	15	Буковые леса Кавказа	Длиннокорневищный	IV–X	V	Отрезками корневищ, семенами	«—»	Пурпурно-бурые
4	Горянка колхидская (<i>Epimedium colchicum</i> (Boiss.) Trautv.)	30	Леса Кавказа	«—»	IV–VIII	V	Отрезками корневищ	Очень перспективный	Ярко-желтые
5	Пупочник весенний (<i>Omphalodes verna</i> Moench)	15	Горные леса Альп	Столбовый	IV–VII	V	Укорененными розетками, делением куста	«—»	Ярко-синие
6	Медуница узколистная (<i>Pulmonaria angustifolia</i> L.)	25	Леса Европы	Короткокорневищный	IV–IX	IV–V	Семенами, делением куста	«—»	Голубые
7	Зубянка железистая (<i>Dentaria glandulosa</i> Waldst. et Kit.)	15	Леса Европы	Длиннокорневищный	Середина IV–X	IV–V	Отрезками корневищ	«—»	Малиновые
8	Толстостенка крупнолистная (<i>Pachyphragma macrophyllum</i> (Hoffm.) N. Busch)	25	Леса Кавказа	Короткокорневищный	IV–VIII	IV–V	Семенами, делением куста	«—»	Белые
9	Ландыш майский (<i>Convallaria majalis</i> L.)	20	Леса Европы	Длиннокорневищный	IV–IX	С середины V до середины VI	Отрезками корневищ	«—»	Белые

Продолжение таблицы

Но- мер п/п	Наименование	Высота, см	Родина	Тип разрастания	Время веге- тации, месяц года	Время цветения, месяц года	Способ размножения	Перспек- тивность	Окраска соцветий
10	Осока ржавопятнистая (<i>Carex siderost- icta</i> HancI)	До 30	Леса Дальнего Востока	Длиннокорне- вищный	IV до IX	В конце V – начале VI	Семенами и отрезками корневищ	Очень пер- спек- тивный	–
11	Живучка пирамидальная (<i>Ajuga pyramidalis</i> L.)	10...30	Песчаные и каме- нистые склоны в Западной Европе	Короткорне- вищный	IV–X	V–VI	Вегетативно	Перспек- тивный	Бледно- голубые
12	Живучка ползучая (<i>A. reptans</i> L.)	15...20	Леса Европы, Кавказа	Столonoобра- зующий	IV–X	VI (15–20 дней)	Вегетативно	Очень пер- спек- тивный	Синие, голубые
13	Зеленчук желтый (<i>Galebdolon luteum</i> Huds.)	15...20	Леса Вос- точной Европы, Кавказа	Ползучий	IV–X	V–VI	Семенами и черенками	«–»	Желтые
14	Яснотка пятни- стая (<i>Lamium maculatum</i> L.)	10...15	Влажные леса Европы	«–»	IV–X	V–X	Семенами и черенками	«–»	Розовато- пурпурные
15	Михения крапи- волистная (<i>Mee- hania urticifolia</i> (Miq.) Makino)	10...20	Леса Дальнего Востока	«–»	V–IX	V–VI	Отрезками побегов	«–»	Голубые
16	Анемона дубравная (<i>Anemone nemorosa</i> L.)	20...25	Леса Европы и Кавказа	Длиннокорне- вищный	С сере- дины IV до конца VII	С конца IV до се- редины V	Семенами и отрезками корневищ	«–»	Белые
17	Равноплодник василистиковый (<i>Isopyrum thalic- troides</i> L.)	15...20	Леса Цен- тральной Европы	«–»	IV–VI	С сере- дины IV (16–22 дня)	Отрезками корневищ	«–»	Белые
18	Ясменник душистый (<i>Asperula odorata</i> L.)	До 30	Леса Европы, Кавказа, Алтая, Дальнего Востока	«–»	IV–X	С конца V до сере- дины VI	Семенами и отрезками корневищ	«–»	Белые
19	Тиарка сердце- листная (<i>Tiarella cordifolia</i> L.)	10...15	Горные хвойные леса востока Северной Америки	Ползучий	IV–X	V–VII	Черенками	«–»	Бело- розовые
20	Толмия Мензье (<i>Tolmiea menzie- sii</i> (Pursh) Torr. ex A. Gray)	20	Горные леса Северной Америки	Короткорне- вищный	IV–X	VI–VII	Семенами и черенками	«–»	Белые
21	Телима крупно- цветковая (<i>Teli- ma grandiflora</i> (Pursh) Douglas)	До 40	Смешан- ные леса востока Северной Америки	«–»	I–XII	V–VII	Семенами, делением куста	«–»	Зеленовато- белые
22	Вальдштейния гравилатовид- ная (<i>Waldsteinia geoides</i> Willd.)	40	Леса Европы	Длиннокорне- вищный	I–XII	V	Семенами и отрезками корневищ	«–»	Белые, красные, розовые

Продолжение таблицы

Но- мер п/п	Наименование	Высота, см	Родина	Тип разрастания	Время веге- тации, месяц года	Время цветения, месяц года	Способ размножения	Перспек- тивность	Окраска соцветий
Светолюбивые растения									
23	Кошачья лапка двудомная (<i>Antennaria dioica</i> L.) Gaerth.)	5...30	Песчаные и каме- нистые почвы Европы, Сибири, Восточ- ной Азии	Ползучий	I–XII	V–VI	Семенами и вегетативно	Очень перспек- тивный	Розовые
24	Полынь Стел- лера (<i>Artemisia schmidtiana</i> Bess.)	20...30	Северные по- бережья Европы и Дальнего Востока	Длиннокорне- вищный	I–XII	VII	Вегетативно	Перспек- тивный	Желтые
25	Алиссум скальная (<i>Alyssum saxatile</i> (L.) Desv.)	20...25	Горные склоны Европы	Стержнекор- невой	IV–XI	V	Семенами, черенками	«←»	Белые
26	Резуха кавказ- ская (<i>Arabis caucasica</i> hort.)	10...20	Леса Кавказа	«←»	IV– VII	V	«←»	Очень перспек- тивный	Розовые, белые
27	Обриета дельтовидная (<i>Aubrieta deltoi- des</i> (L.) DC.)	12...15	Горные склоны на Балка- нах	«←»	IV– VII	V	Черенками	Перспек- тивный	Светло- лиловые, темно- сиреневые
28	Иберис вечно- зеленый (<i>Iberis sempervirens</i> L.)	15...20	Горные склоны Южной Европы	Ползучий	I–XII	V	Семенами, черенками	«←»	Белые
29	Ясколка войлоч- ная (<i>Cerastium tomentosum</i> L.)	30	Горы Апенни- ны	«←»	I–XII	VI	«←»	«←»	Белые
30	Гвоздика тра- вянка (<i>Dianthus deltoids</i> L.)	5...15	Луга Европы	«←»	I–XII	VI–VII	«←»	Очень перспек- тивный	Розовые, малиновые, темно- лиловые
31	Очиток едкий (<i>Sedum acre</i> L.)	5...10	Песчаные и каме- нистые почвы Европы и Малой Азии	«←»	I–XII	С середи- ны VI до середи- ны VII	«←»	«←»	Желтые
32	Очиток белый (<i>S. album</i> L.)	До 20	Горы Европы, Кавказа, Малой Азии	«←»	I–XII	VI–VII	«←»	«←»	Бело- розовые
33	Очиток гибридный (<i>S. hybridum</i> L.)	До 20	Европа, Сибирь, Цен- тральная Азия	«←»	I–XII	С VI до конца VII	Семенное и вегетативно	«←»	Желтые
34	Очиток Мид- дендорфа (<i>S. middendorffi- anum</i> Maxim.)	15...20	Скалы на по- бережье Дальнего Востока	Кистекорневой	С сере- дины IV до X	VI–VII	Семенами, черенками	«←»	Желтые

Окончание таблицы

Но- мер п/п	Наименование	Высота, см	Родина	Тип разрастания	Время веге- тации, месяц года	Время цветения, месяц года	Способ размножения	Перспек- тивность	Окраска соцветий
35	Очиток ложный (<i>S. spurium</i> Bieb.)	8...15	Горы Кавказа	Ползучий	I–XII	VII–VIII	Семенами, черенками	Очень перспек- тивный	Розовые, ярко- и темно- красные
36	Герань Эндриса (<i>Geranium</i> <i>endressii</i> J. Gay)	До 30	Горные луга на Пиренеях	Короткокорне- вищный	IV–XI	V–VII	«←→»	«←→»	Светло- розовые
37	Змееголов- ник крупно- цветковый (<i>Dracocephalum</i> <i>grandiflorum</i> L.)	30...35	Скалы и альпий- ские луга в Вос- точной Сибири, Цен- тральной Азии	«←→»	IV–XI	VI–VIII	«←→»	Перспек- тивный	Белые, голубые или синие
38	Тимьян лимон- нопахнувший (<i>Thymus x citri- odorus</i> (Pers.) Schreb.)	15...20	Песчаные и каме- нистые почвы Европы, Кавказа	Ползучий	IV–X	VI–VII	Черенками	«←→»	Розовые
39	Тимьян ранний (<i>T. praecox</i> Opiz.)	3...5	Песчаные и каме- нистые почвы Европы, Кавказа	«←→»	IV–X	VII	Семенами, черенками, делением куста	«←→»	Лиловые, розовые или белые
40	Флокс шиловидный (<i>Phlox</i> <i>subulata</i> L.)	15...17	Горы восточ- ной части Северной Америки	«←→»	I–XII	С середи- ны V до конца VI	Черенковани- ем, делением куста	Очень перспек- тивный	От белой, розовой до пурпурной и лиловой

Работа выполнена в рамках ГЗ ГБС РАН
(№ 118021490111-5)

Список литературы

- [1] Сидорук Т.Н., Сидорук Б.С. Биология некоторых видов почвопокровных растений. Киев: Наук. думка, 1992. 102 с.
- [2] Прохорова Ю.М. Почвопокровные растения для устройства газона // Докл. АКХ им. К.Д. Памфилова. М., 1966. С. 23–25.
- [3] Рубцов Л.И. Почвопокровные, заменяющие злаковый газон, растения // Зеленое строительство, 1939. № 1. С. 9–11.
- [4] Бондорина И.А., Кабанов А.В., Мамаева Н.А. Подходы к формированию и поддержанию коллекционного фонда сортов травянистых многолетников отдела декоративных растений ГБС РАН // Вестник Удмуртского ун-та. Сер. Биология. Науки о Земле, 2016. Т. 26. Вып. 3. С. 40–44.
- [5] Травянистые декоративные многолетники Главного ботанического сада им. Н.В. Цицина РАН: 60 лет интродукции / Под ред. А.С. Демидова. М.: Наука, 2009. 396 с.
- [6] Цветочно-декоративные травянистые растения (краткие итоги интродукции). М.: Наука, 1983. 272 с.
- [7] Декоративные многолетники (краткие итоги интродукции). М.: Изд-во АН СССР, 1960. 333 с.
- [8] Данилова Н.С. Интродукционное изучение растений природной флоры Якутии. Якутск: ЯГУ, 2002. С. 12–18.
- [9] Карписонова Р.А., Демидов А.С. Принципы создания и изучения коллекций декоративных растений ГБС РАН // Ин-форм. бюл. Совета ботан. садов России, 1997. Вып. 7. С. 25–31.
- [10] Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Вып. 6. Декоративные культуры. М.: Колос, 1968. 223 с.
- [11] Методика государственного сортоиспытания декоративных культур. М.: Изд-во Мин-ва сельского хозяйства РСФСР, 1960. 182 с.
- [12] Методика фенологических наблюдений в ботанических садах СССР. М.: Изд-во ГБС АН СССР, 1975. 27 с.
- [13] Бочкова И.Ю. Создаем стильный цветник. М.: Фитон+, 2011. 240 с.
- [14] Соколова Т.А., Бочкова И.Ю., Бобылева О.Н. Цвет в ландшафтном дизайне. М.: Фитон+, 2007. 128 с.
- [15] Карписонова Р.А. Цветоводство. М.: Кладезь, 2007. 256 с.

- [16] Карписонова Р.А. Стильный цветник. Популярная энциклопедия. М.: АСТ, 2018. 192 с.
- [17] Рысин Л.П., Рысина Г.П. Морфоструктура подземных органов лесных травянистых растений. М.: Наука, 1987. 208 с.
- [18] Карписонова Р.А. Цветник в тени. М.: Кладезь-Букс, 2005. 143 с.
- [19] Серебряков И.Г., Серебрякова Т.И. О двух типах формирования корневищ у травянистых многолетников // Бюл. Мос. об-ва испытателей природы. Отд. биология, 1995. Вып. 2. С. 184–196.
- [20] Гладкий Н.П., Тавлинова Г.К. Многолетние цветы в садах и парках. Л.: Лениздат, 1951. 151 с.
- [21] Шестаченко Г.В. Размножение растений для озеленения каменистых садов, откосов и склонов // Интродукция, биология и селекция цветочных растений. Ялта, 1981. С. 66–87.

Сведения об авторах

Бочкова Ирина Юрьевна — канд. с.-х. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), frog-flower@yandex.ru

Хохлачева Юлия Анатольевна — канд. с.-х. наук, научный сотрудник ФГБУН «Главный ботанический сад имени Н.В. Цицина РАН», jusic-la@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.06.2020.

Принята к публикации 22.09.2020.

GROUND COVER PLANTS RESEARCH FOR OBJECTS OF LANDSCAPE ARCHITECTURE

I.Yu. Bochkova¹, Yu.A. Khokhlacheva²

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

²The N.V. Tsitsin Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences, 4, Botanicheskaya st., 127276, Moscow, Russia

frog-flower@yandex.ru

This article presents the results of work on the selection of groundcover plants (both light-loving and shade-tolerant) that are promising and very promising for use on landscape architecture objects. The work was carried out during 2018 on the basis of the collection Fund of the laboratory of ornamental plants of the Main Botanical garden (MBG RAS), on two experimental sites located on the main territory of the MBG RAS, in the collection-exhibition «Shadow garden» and on the exhibition area «Decorative perennials». A total of 225 plants were selected during the study. During the growing season, field surveys of experimental samples were systematically performed and phenological observations were made. Field studies included biometric measurements of the height of the Bush and peduncle, the diameter of the Bush, the diameter/length of the flower/inflorescence, as well as refinement of the color of the flowers/inflorescences (using a special color scale of the English Royal society of flower growers (RHS color Chart)). The result of this work is a list that includes 40 names. These are very promising and promising species that we recommend for use in urban gardening.

Keywords: flower decoration, perennials, groundcovers, urban landscaping

Suggested citation: Bochkova I.Yu., Khokhlacheva Yu.A. *Issledovanie pochvopokrovnykh rasteniy s tsel'yu ikh ispol'zovaniya na obektakh landshaftnoy arkhitektury* [Ground cover plants research for objects of landscape architecture]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 1, pp. 53–63. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-53-63

References

- [1] Sidoruk T.N., Sidoruk B.S. *Biologiya nekotorykh vidov pochvopokrovnykh rasteniy* [Biology of some types of groundcover plants]. Kiev: Naukova dumka, 1992, 102 p.
- [2] Prokhorova Yu.M. *Pochvopokrovnye rasteniya dlya ustroystva gazona* [Groundcover plants for lawn construction]. Dokl. AKKh im. K.D. Pamfilova [Abstracts of reports of the Academy of public utilities named after K.D. Pamfilov]. Moscow, 1966, pp. 23–25.
- [3] Rubtsov L.I. *Pochvopokrovnye, zamenyayushchie zlakovyy gazon, rasteniya* [Ground cover, replacing the grass lawn, plants]. *Zelenoe stroitel'stvo* [Green building], 1939, no. 1, pp. 9–11.
- [4] Bondorina I.A., Kabanov A.V., Mamaeva N.A. *Podkhody k formirovaniyu i podderzhaniiu kollektcionnogo fonda sortov travyanistykh mnogoletnikov otdela dekorativnykh rasteniy GBS RAN* [Approaches to the formation and maintenance of the collection Fund of varieties of herbaceous perennials of the Department of ornamental plants of the MBG RAS]. *Vestnik Udmurtskogo un-ta. Ser. Biologiya. Nauki o Zemle* [Bulletin of Udmurt University. Series Biology, Earth Sciences], 2016, v. 26, no. 3, pp. 40–44.
- [5] *Travyanistyye dekorativnye mnogoletniki Glavnogo botanicheskogo sada im. N.V. Tsitsina RAN: 60 let introduktsii* [Herbaceous ornamental perennials Of the main Botanical garden named after N.V. Tsitsin of the Russian Academy of Sciences: 60 years of introduction]. Moscow: Nauka, 2009, 396 p.

- [6] *Tsvetochno-dekorativnye travyanistye rasteniya (kratkie itogi introduksii)* [Flower and ornamental herbaceous plants (brief introduction results)]. Moscow: Nauka, 1983, 272 p.
- [7] *Dekorativnye mnogoletniki (kratkie itogi introdukcii)* [Ornamental perennials (summary results of the introduction)]. Moscow: AN SSSR, 1960, 333 p.
- [8] Danilova N.S. *Introdukcionnoe izuchenie rastenij prirodnoj flory Jakutii* [Introduction study of plants of the natural flora of Yakutia]. Yakutsk: YaGU, 2002, pp. 12–18.
- [9] Karpisonova R.A., Demidov A.S. *Printsipy sozdaniya i izucheniya kolleksiy dekorativnykh rasteniy GBS RAN* [Principles of creation and study of collections of ornamental plants of the MBG of RAS]. Inform. byul. soveta botan. sadov Rossii [Inform. Bul. Council of Botanic Gardens of Russia], 1997, no. 7, pp. 25–31.
- [10] *Metodika gosudarstvennogo sortoispytaniya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur. Vyp. 6 (Dekorativnye kul'tury)* [Methods of state variety testing of agricultural crops. Issue 6 (decorative crops)]. Moscow: Kolos, 1968, 223 p.
- [11] *Metodika gosudarstvennogo sortoispytaniya dekorativnykh kul'tur* [Methods of state variety testing of ornamental crops]. Moscow: Izd-vo Min. s/h RSFSR, 1960, 182 p.
- [12] *Metodika fenologicheskikh nablyudeniy v botanicheskikh sadakh SSSR* [Methods of phenological observations in the Botanical gardens of the USSR]. Moscow, 1975, 27 p.
- [13] Bochkova I.Yu. *Sozdaem stil'nyy tsvetnik* [Creating a stylish flower garden]. Moscow: Phytion+, 2011, 240 p.
- [14] Sokolova T.A., Bochkova I.Yu., Bobyleva O.N. *Tsvet v landsaftnom dizayne* [Color in landscape design]. Moscow: Phytion+, 2007, 128 p.
- [15] Karpisonova R.A. *Cvetovodstvo* [Floriculture]. Moscow: Kladez', 2007, 256 p.
- [16] Karpisonova R.A. *Stil'nyy tsvetnik. Populyarnaya entsiklopediya* [Stylish flower garden. Popular encyclopedia]. Moscow: AST, 2018, 192 p.
- [17] Rysin L.P., Rysina G.P. *Morfostruktura podzemnykh organov lesnykh travyanistykh rasteniy* [The land structure of underground organs of herbaceous forest plants]. Moscow: Nauka, 1987, 208 p.
- [18] Karpisonova R.A. *Cvetnik v teni* [Flower garden in the shade]. Moscow: Kladez'-Buks, 2005, 143 p.
- [19] Serebryakov I.G., Serebryakova T.I. *O dvukh tipakh formirovaniya kornevishch u travyanistykh mnogoletnikov* [About two types of rhizome formation in herbaceous perennials]. Byull. Moskovskogo obshchestva ispytateley prirody. Otd. biologiya [Bulletin of the Moscow society of nature testers. Department of biology], 1995, no. 2, pp. 184–196.
- [20] Gladkii N.P., Tavlinova G.K. *Mноголетние цветы в садах и парках* [Perennial flowers in gardens and parks]. Leningrad: Lenizdat, 1951, 151 p.
- [21] Shestachenko G.V. *Razmnozhenie rasteniy dlya ozeleneniya kamenistykh sadov, otkosov i sklonov* [Propagation of plants for landscaping stony gardens, slopes and slopes]. Introduktsiya, biologiya i selektsiya tsvetochnykh rasteniy [Introduction, biology and selection of flower plants]. Yalta, 1981, pp. 66–87.

Authors' information

Bochkova Irina Yur'yevna — Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), frog-flower@yandex.ru

Khokhlacheva Yuliya Anatol'yevna — Cand. Sci. (Agriculture), Researcher of the N.V. Tsitsin Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences, jusic-la@yandex.ru

Received 15.06.2020.

Accepted for publication 22.09.2020.

ИМПЕРАТОРСКАЯ АЛЛЕЯ И БЫКОВА РОЩА В МУЗЕЕ-УСАДЬБЕ «АРХАНГЕЛЬСКОЕ»: ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ, РЕСТАВРАЦИИ И ПРИСПОСОБЛЕНИЯ К СОВРЕМЕННЫМ УСЛОВИЯМ

А.В. Фролова¹, В.А. Леонова²

¹ФГБУК «Государственный музей-усадьба «Архангельское», 143420, Московская обл., Красногорский р-н, пос. Архангельское

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

vstile2012@yandex.ru

Представлена историческая справка о владельцах, этапах развития усадьбы «Архангельское» и о создании парка. Особое внимание уделено планировочной структуре усадьбы, ее главной композиционной оси северной части — Императорской аллее и Быковой роще. Подробно рассмотрено современное состояние и проблемы реставрации Императорской аллеи и возможности приспособления Быковой рощи к современным условиям рекреации. Указан основной древесный ассортимент Быковой рощи и даны рекомендации по уходу. Впервые проработаны архивы музея-усадьбы (проекты 1978, 2001 и 2017 гг.), все данные о Быковой роще и Императорской аллее собраны в хронологическом порядке и описаны в статье. Авторами были проведены последние исследования перед реставрацией и приспособлением 2018 г.

Ключевые слова: музей-усадьба, Архангельское, главная композиционная ось, Императорская аллея, реставрация, дворец, Быкова роща, приспособление

Ссылка для цитирования: Фролова А.В., Леонова В.А. Императорская аллея и Быкова роща в музее-усадьбе «Архангельское»: история создания, реставрации и приспособления к современным условиям // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 1. С. 64–71. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-64-71

Старинная усадьба «Архангельское» представляет собой особо ценный объект культурного наследия Подмосковья федерального значения, история которого прослеживается с первой половины XVI в. и по настоящее время. Уникальность усадьбы состоит в том, что дом и парк построены одновременно — в 80–90-х годах XVIII в., при этом ее первые парковые устройства были сооружены под влиянием Петербургских садов: Летнего сада и Петергофа. Но самое главное — Архангельское завершает этап развития русского регулярного паркостроения в период, когда в России уже начался расцвет пейзажных парков [1].

«Дворцово-парковый ансамбль «Архангельское» представляет собой памятник архитектуры и садово-паркового искусства XVIII — начала XIX в. Расцвет усадебного комплекса приходится на 20–30-е годы XIX столетия (период владения Н.Б. Юсуповым. — *Прим. авт.*). Именно на этот период было принято решение воссоздать дворцово-парковый ансамбль. К сожалению, значительные утраты произошли за несколько столетий, как в декоративном оформлении, так и в естественном процессе вырождения растительности» [2].

По проекту выдающегося ландшафтного архитектора-реставратора Агальцовой Валентины Александровны в 1978–1985 гг. была проведена реставрация регулярного сада.

Цель работы

Цель работы — проследить историю возникновения Императорской аллеи, сохранения и вос-

создания ее как главной композиционной оси в северной части усадьбы и рассмотреть вопрос приспособления Быковой рощи к современным условиям использования.

Историческая справка

«Первое упоминание о месте, где ныне расположено Архангельское, относится к 1537 году: в «разъезжей грамоте» звенигородских писцов, в связи с определением границ поместных земель отмечается сельцо Уполозы, принадлежавшее дворянину Алексею Ивановичу Уполоцкому. В селе была «церковь... без пения да два двора вотчинникова» [3].

Затем с 1660 г. усадьба находилась во владении князя Я.Н. Одоевского. Эта вотчина имела небольшой двор и жилые хоромы. «В 1681 году в качестве приданого своей дочери Одоевский отдает Архангельское, выдавая ее замуж за князя М.Я. Черкасского. К этому времени в селе значится уже каменная церковь, сохранившаяся до настоящего времени». «С 1703 года Архангельское принадлежит князю Д.М. Голицыну, женатому на Одоевской, которому село досталось по родству его жены с Черкасской» [4].

Голицын был одним из образованнейших людей эпохи Петра I. «При Анне Иоанновне князь, участвовавший в дворцовом заговоре, попадает в опалу и с 1730 года постоянно живет в своей подмосковной усадьбе» [5]. «Голицын, хорошо знакомый с европейской культурой, не хотел уже довольствоваться усадьбой XVII века и ее до-

петровским бытом» [6] и задумывает перенести центральное ядро усадьбы. «Западнее от существовавшего двора, между двумя оврагами, он приказывает отодвинуть местоположение дома от берега реки на 450–500 м, что обеспечит открытость пространства и перспективные виды на окрестности и разбить парк» [5].

Заложенный еще в 1730-е годы регулярный парк представлял собой территорию размерами 405×320 м «с перспективными дорогами», вдоль которых были высажены клены и липы. На плане 1767 г. показано членение территории на 6 частей — боскетов (не совпадающих с современной планировкой боскетов). В прошлом композиция усадьбы была организована по оси запад — восток, т. е. параллельно фасаду главного дома. Начавшиеся строительные работы были прекращены в связи с арестом и смертью владельца в 1736 г.

«Дальнейшее строительство в Архангельском ведется уже внуком Д.М. Голицына — Николаем Алексеевичем Голицыным, в 80-х годах XVIII века» [7]. «Как многие представители высшего дворянства во времена Екатерины II и Павла I Н.А. Голицын получил хорошее образование, много путешествовал, был послом в Швеции, а по приезде в Петербург заведовал итальянской и балетной труппами императорского театра» [8]. В 1784 г. Николай Алексеевич по проекту французского архитектора де Герна, возвел новый Большой дом (дворец), соединенный двумя колоннадами с одноэтажными флигелями. В западном боскете регулярного сада были простроены павильоны «Каприз» и «Библиотека». Князь наладил водоснабжение парка, выстроил Руинные Римские ворота, оранжереи.

В 1790-е годы формируется главная композиционная ось (север — юг) в виде системы террас на месте прежнего дома. В это же время был реконструирован старый сад, увеличена его площадь с учетом вкусов и моды того времени, заимствованных из Европы. Удивительная особенность Архангельского — сочетание строгой симметрии регулярной планировки сада с обширными пространствами природного окружения.

«Усадьбу отличает гармоничное единство больших перспектив и тщательнейшая отделка мелких архитектурных деталей, синтез естественного и созданного человеком» [9]. В усадьбе «главная роль принадлежит «подстриженной» природе, здесь везде искусство, везде разумная человеческая мысль, умеющая извлекать из природы скрытую в ней красоту» [10].

В период владения Н.А. Голицына на месте пахотных земель была создана Быкова роща с двумя взаимно перпендикулярными просеками, одна из которых является продолжением главной компо-

зиционной оси ансамбля к северу от дворцового комплекса. Н.А. Карамзин писал в 1803 г. о рощах в Архангельском: «Рощи, где дикость природы соединяется с удобствами искусства, и всякая дорожка ведет к чему-нибудь приятному — или к хорошему виду, или к обширному лугу, или к живописной дичи — наконец, заступают у нас место так называемых правильных садов, которые ни на что не похожи в натуре и совсем не действуют на воображение» [11].

В 1809 г. умер Н.А. Голицын, и в 1810 г., его вдова продала «обремененное долгом Архангельское Николаю Борисовичу Юсупову» [4]. «Образованный вельможа, имевший более 30 тысяч крепостных и два десятка имений в различных губерниях России, князь Юсупов был характерным представителем века Екатерины» [3]. Николай Борисович обладал большими коллекциями произведений искусства: картинами, гравюрами, скульптурами, мебелью, мрамором, бронзой, хрусталем, фарфором, книгами и т. д. Он был знаком с такими философами, как Вольтер, Дидро, Руссо и Бомарше. «Однако знакомство с европейской культурой и большой интерес к искусству прекрасно уживались в Юсупове с нравами крепостника» [12].

Война 1812 г. приостановила строительство в усадьбе, но с 1813 г. «начинается второй строительный период в Архангельском, который тянется до 1820 года, когда пожар истребил почти все внутреннее убранство Большого дома» [4]. В восстановительных работах после пожара принимали участие «лучшие московские архитекторы того времени: И.И. Бове, Е.Д. Тюрин и С.П. Мельников» [13]. Всеми работами руководил крепостной архитектор Юсупова — Василий Яковлевич Стрижаков. Установлено было по архивным материалам, что в строительстве Архангельского также принимали участие и другие крепостные мастера, являющиеся учениками Стрижакова: Ф. Бредихин, И. Борунов, Л. Рабутовский, С. Сумаковский.

Залы дворца были заново восстановлены и расписаны в стиле позднего классицизма. «В конце 1815 — начале 1816 гг. в Архангельском начался период масштабных систематических преобразований, направленных на развитие пейзажного парка» [14]. Н.Б. Юсупов уделил большое внимание созданию рощ (Архангельская, Захарковская, Быкова (рис. 1), Малиновая, Князьборисова, Горятинская, Аполлонова). Большая часть рощ создана искусственно, методом лесных культур, о чем свидетельствуют исторические материалы и сохранившаяся часть древесной растительности, которую использовали при восстановлении, реконструкции регулярного сада.



Рис. 1. Быкова роща
Fig. 1. Bykov grove



Рис. 2. Вид на Парадный двор и главные ворота в 2020 г.
Fig. 2. View of the Front Yard and Main Gate in 2020

Кроме того боскеты регулярного сада использовались в качестве питомников, где выращивался посадочный материал для создания пейзажных рощ. «В одной из таких рощ, недалеко от Горятинских прудов 1817–1818 годах было построено здание театра (до того он помещался в западном флигеле дворца) [13].

Последние сооружения, которые были сделаны при жизни Н.Б. Юсупова, — это две беседки, установленные на высоких точках склона с видом на старицу Москвы-реки, с открывающимися неповторимыми видами окрестностей и противоположного берега на Лохин остров. «Обе беседки были сооружены по проекту В.Г. Дрегалова и располагались симметрично по отношению к оранжерейным корпусам, завершая композиционное решение регулярного сада» [15].

В 1831 г. после смерти Н.Б. Юсупова имение стало угасать, и до 1849 г. им владел сын бывшего владельца — Борис Николаевич Юсупов. Теперь Архангельскому уделялось значительно меньше внимания. Сын пытался уплатить большой долг, который числился за старым князем (Н.Б. Юсуповым). «Почти все картины и скульптуры перевезли в Петербург. Зверинец продали, театр разогнали. Император Николай вмешался было, но поздно: что случилось, то случилось» [16].

«Следующим владельцем Архангельского становится в 1849 году Н.Б. Юсупов-младший, как и дед, страстный любитель искусства, прекрасный знаток русской музыки, пополнивший сокровища Архангельского коллекцией скрипок, в том числе и знаменитых итальянцев» [17]. Большую часть своего времени он проводил за границей на лечении, но иногда приезжал в усадьбу. Под чутким руководством крепостного архитектора Петра Шестакова были возобновлены строительные работы по реставрации дворца, оранжерейных флигелей, театра и других построек. Но с 1870 г. имение часто пустовало, потому что владельцы проживали за границей, а усадьбой управляли доверенные люди Юсуповых. Спустя некоторое время Архангельское начало оживать, и владельцы стали проводить в нем летние месяцы, возрождая свои лучшие традиции.

С 1891 г. Архангельское перешло во владение Зинаиды Николаевны Юсуповой, графини Сумароковой-Эльстон. Последние владельцы провели небольшой ремонт в усадьбе, и обновили художественную роспись стен во дворце. «Также основные изменения в усадьбе касались регулярного парка и территории восточной парка. В западной части усадьбы планировка в рощах не менялась» [15]. Последним крупным сооружением усадьбы, по проекту Р.И. Клейна и при участии Г.Б. Бархина стал храм-усыпальница князей Юсуповых, умело вписанный архитекторами в восточную часть усадьбы.

«Но стремления воссоздать усадьбу и довести ее до прежней художественной высоты последние владельцы не имели, и вывезенные в Петербург художественные ценности были возвращены в Архангельское в ведение Наркомпроса, и была превращена в музей-усадьбу» [4].

Материалы и методы

Методика исследований по северной части усадьбы «Архангельское» включала в себя два этапа:

1) изучение литературных, архивных и проектных материалов (по общепринятой методике историко-архивной работы с литературными источниками);

2) визуально-ландшафтный анализ территории и анализ типов насаждений (по методике, разработанной под руководством Л.М. Фурсовой [1]).

Материалом исследования послужили древесные и травянистые растения Императорской аллеи и Быковой рощи. На сегодняшний день Быкова роща является мемориальным памятником конца XVIII — нач. XIX вв.

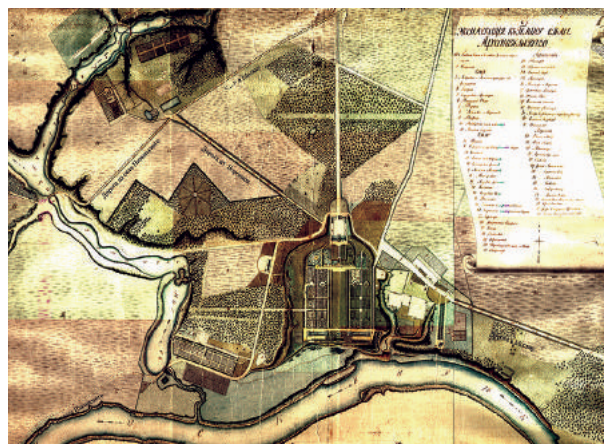
Результаты и обсуждение

Планировочная структура усадьбы. В настоящее время центральное ядро усадьбы занимает дворец с колоннадами по обеим сторонам, флигелями Г-образной формы и кулисными стенами, закрывающими нижний этаж флигелей для создания иллюзии большой протяженности колонн. Пространство Парадного двора в 1817 г. было завершено въездными воротами и замкнуто триумфальной аркой по проекту архитектора С.П. Мельникова (рис. 2).

Главной композиционно-планировочной осью в усадьбе является Императорская аллея, ориентированная с севера на юг. Она была создана в конце XVIII в. при строительстве дворцово-паркового ансамбля из просеки, прорубленной в Быковой роще, и до начала XIX в. являлась продолжением главной оси в северной части усадьбы. Ширина главной подъездной дороги составляла 7,5–8 м, а длина — 650 м. Покрытие дороги было выполнено из тесанного булыжного камня. Начинаясь главная ось симметрии от подъездной липовой аллеи, ведущей через Быкову рощу к главным въездным воротам с аркой, через овальный зал дворца, террасы, большой партер и уводила взор в сторону заповедной территории — Лохин остров через старицу Москвы-реки.

На планах 1818 и 1829 гг. (рис. 3) показано, что перед въездными воротами Парадного двора был устроен аванкур — небольшая поляна полукруглой формы, огороженная деревянным трельяжем, увитым зеленью по ее периметру и со скульптурами, располагавшимися в его нишах. «За трельяжами в роще находились шатровидные сторожевые будки, также зеленые» [4].

На поляне перед дворцом проводились праздничные гуляния, разбивали шатер, а сама поляна была окружена взрослыми насаждениями (рис. 4). Во второй половине XIX в. трельяжи и шатры разобрали, и древесная растительность



а



б

Рис. 3. План Архангельского 1818 г. (а) и 1829 г. (б) (фонд ГМУ «Архангельское»)

Fig. 3. Plan of Arkhangelskoye 1818 (a) and 1829 (b) (foundation of the SME «Arkhangelskoye»)



Рис. 4. Гравюра Шестакова П.А. «Въездная арка и придворцовые флигеля». 1857 г. (фонд ГМУ «Архангельское»)

Fig. 4. Engraving of Shestakov P.A. «Entrance Arch and Court Outbuildings». 1857 (fund of the SME «Arkhangelskoye»)

заполнила в прошлом открытое пространство, тем самым закрывая архитектуру дворца со стороны Императорской аллеи.



а



б

Рис. 5. Императорская аллея от входной группы до реставрации 2019 г. (а) и после реставрации 2019 г. (б)

Fig. 5. Imperial alley from the entrance group to the restoration of 2019 (а) and after the restoration of 2019 (б)

В 2001 г. коллективом ландшафтной реставрационной мастерской ООО «Русский сад» под руководством ландшафтного архитектора-реставратора В.А. Агальцовой была подготовлена научно-проектная документация, в которой указано, что «диаметр открытого пространства (поляна) был равен ширине дворцового ансамбля с обходными дорожками, но отстояло оно от фасада на некотором расстоянии, что давало зрителю дополнительное пространство для обзора архитектуры зданий. Внутри трельяжное пространство было замкнутым, но в нем было три прохода — центральный (главная Императорская аллея) и два боковых. За пределами деревянной решетки трельяжа была посажена двурядная живая изгородь из караганы древовидной» [18]. Дорога, пересекавшая поляну в этой части была огорожена невысоким заборчиком со столбиками.

Современное состояние. По происшествию нескольких столетий вдоль главной аллеи деревья

поднялись высоко и разрослись, утратив свой декоративный вид и полностью закрыв обзор главных ворот и бельведера дворца, что открывался от заставы (рис. 5).

Также в 2001 г. сотрудники организации «Русский сад» при проведении археологических работ по выявлению исторических дорог и их покрытий обнаружили, что Императорская аллея была покрыта колотым гранитом, уложенным торцом «в расклин» [15], хотя до лета 2019 г. верхнее покрытие аллеи было асфальтовым.

Спустя некоторое время, полукруглая площадка перед въездными воротами и флигелями заросла малоценной растительностью. Трельяжи утрачены, как и двурядная живая изгородь из акации желтой. Разросшаяся порослевая древесная растительность, которая создает сильное затенение, привела к тому, что сформировался новый травянистый покров из *сныти*, *копытня*, *крапивы*, *гравилата* и других трав.

По результатам наших обследований Быковой рощи с 2017 по 2020 гг. установлено, что в ее западной и восточной частях имеются насаждения из *сосны* возрастом 160–180, *липы* — 100–130, *березы* — 80–90, *ели* — 80–140 лет и разросшегося молодого *клена остролистного* возрастом 30–40 лет. В юго-западной части в настоящее время произрастают *липа*, *ель*, *сосна* от 80 до 160 лет, тогда как в прошлом — строевой *сосновый лес*. В этой части также расположены хозяйственный двор и складские помещения музея, которые мешают восприятию северного фасада флигелей, потому что находятся близко к зданию. Специальные лесопатологические обследования в насаждениях не проводились. В 2017 г. в роще был вырублен весь подлесок (*черемуха*, *жиолость*, *бересклет бородавчатый*).

Весь летний и осенний периоды 2019 г. шли работы по уборке рощи от захламленности, ветровальных, буреломных, упавших деревьев и сучьев при помощи волонтеров из различных организаций и сотрудников музея, вдохнувших новую жизнь в историческое место.

Рекомендуемые мероприятия. При разработке упомянутой выше документации В.А. Агальцовой 2001 г. были внесены корректировки в проект 1978 г. на основании ландшафтно-исторического и визуального анализа и проведенных натурных исследований. Также были изучены архивные материалы музея-усадьбы, которые могут быть основой для составления нового проекта воссоздания исторического ландшафта данной территории.

Восстановление видового раскрытия перспективы на дворец — главной композиционной оси возможно при условии санитарной, формовочной обрезки и прореживания (осветления) крон Императорской аллеи. По проекту В.А. Агальцовой

2001 г. необходимо было провести следующие мероприятия:

- воссоздать полукруглую площадку перед флигелями и въездными воротами;
- удалить малоценную растительность в пределах полукруга и за ним на расстоянии 5 м;
- создать обыкновенный газон на вновь открытом пространстве;
- воссоздать деревянный зеленый трельяж и скульптуры по имеющимся в архиве музея чертежам;
- посадить живую изгородь из караганы древовидной по периметру трельяжа.

Позднее были разработаны проекты и других организаций, но, увы, финансирования выделено на них не было. До зимы 2018 г. уход за данной территорией проводился в рамках эксплуатации парка собственными силами садовников парковой службы музея.

Спустя 17 лет в 2018 г. компанией ООО «Ваухаус» была разработана и согласована с Главным Управлением культурного наследия Московской обл. научно-проектная документация по проекту «Реставрация и приспособление объекта культурного наследия федерального значения ансамбля усадьбы «Архангельское» в рамках территории общей площадью 72,27 га.

Осенью 2019 г. по данному проекту подрядной организацией были проведены производственные работы по реставрации Императорской аллеи и приспособлению к современному использованию Быковой рощи площадью 33,50 га. В пределах данной территории были выполнены следующие мероприятия:

- вдоль Императорской аллеи и в зоне аванкура (поляна с северной стороны дворца) осуществлена санитарная и реставрационная рубка 100 деревьев;
- выполнена санитарная и формовочная обрезка всех деревьев, произрастающих по краям аллеи, а также перекрывающих своими разросшимися ветвями вид на дворец с бельведером;
- выполнена санитарная и формовочная обрезка деревьев в зоне аванкура;
- асфальтовое покрытие заменено гранитной плиткой и гранитным отсевом;
- в Быковой роще проложены новые маршруты дорожно-тропиночной сети из древесной щепы и отреставрированы исторические дороги;
- заменены фонарные столбы советского периода на современные;
- посажены древесно-кустарниковые насаждения в роще (*береза повислая, рябина обыкновенная, спирея березолистная, спирея дубравколистная, спирея Дугласа, спирея японская 'Anthony waterer', спирея 'Little Princess', дерен белый 'Sibirica', чубушник вечный, пузыреплодник калинолистный, кочедыжник женский, барвинок малый*).



а



б

Рис. 6. Быкова роща до (а) и после реставрации и приспособления к современным условиям 2020 г. (б)

Fig. 6. Bykov grove before (a) and after restoration and adaptation to modern conditions of 2020 (b)

В рамках проекта приспособления к современному использованию Быковой рощи компанией ООО «Ваухаус» были разработаны композиционные узлы: экскурсионная поляна, детская площадка «Калистения», площадка для игры, «сухой» пруд, летняя читальня «Диспуториум», летний открытый лекторий и ландшафтный лабиринт. Осенью 2019 г. проект был реализован.

Таким образом, прогулки по тенистым отреставрированным дорожкам позволяют насладиться уединением и почувствовать старинный дух двухсотлетней рощи (рис. 6).

Выводы

1. Быкова роща, заложенная во времена Николая Алексеевича Голицына (конец XVIII в.), сохранилась до наших дней со значительными изменениями (ее состояние удовлетворительное).

2. Старовозрастных древесных насаждений сохранилось немного. Основные исторические

породы рощи — это *сосна обыкновенная*, *липа мелколистная* и *береза повислая*. Однако в настоящее время происходит смена пород, в частности идет интенсивный отпад перестойных *берез*, также спущен пруд — копань, а поляна (аванкур) заросла малоценной растительностью (показатель хозяйственной бездеятельности музея). Под пологом старовозрастных деревьев поднимаются *ель обыкновенная* и *клен остролистный*, которые захватывают большие территории и меняют световой режим рощи. Поэтому, к сожалению, отсутствует возобновление *сосны*, тогда как на Лохине острове при благоприятном световом режиме произрастает много молодых деревьев *сосны обыкновенной*. Следует отметить, что восстановить рощу в первоначальном ее виде невозможно, поэтому «ее реконструкция может быть весьма приблизительным моделированием прошлого» [19].

3. В целях ухода за рощей необходимо провести следующие лесохозяйственные мероприятия: рубки ухода (осветление, прочистку, прореживание, проходные обновления и переформирования) подростка и подлеска, и санитарно-оздоровительные мероприятия (уход за особо ценными деревьями, санитарную рубку, уборку сухостоя, защиту насаждений от вредителей и болезней).

Сегодня актуальной задачей на государственном уровне остается выявление и сохранение культурного наследия. Многие усадебные парки исчезают, уходят в небытие. И главная цель нашего времени — реставрация или реконструкция, консервация исторических парков и приспособление территории к современным потребностям посетителей, при максимальном сохранении предмета охраны. Сложную задачу по спасению объектов национальной культуры можно решить при совместной работе специалистов различных областей, в частности дендрологов, гидрологов, почвоведов, лесопатологов, специалистов музейного дела, работников Министерства культуры Российской Федерации и Министерства культуры Московской области под руководством ландшафтных архитекторов-реставраторов, обладающих глубокими знаниями по воссозданию объектов культурного наследия и понимающих усадебную культуру.

«Может быть, больше, чем другие усадьбы, Архангельское надо знать, уметь воспринять его

с тем знаточеством, которое так ценно при изучении города или местности, насыщенных старинными памятниками» [20].

Список литературы

- [1] Боговая И.О., Фурсова Л.М. Ландшафтное искусство. М., Агропромиздат, 1988. С. 223
- [2] Проект восстановления и реконструкции парка музея-усадьбы «Архангельское» I этап: отдел капитального строительства и реставрации ФГБУ музей-усадьба «Архангельское». Москва: Центральное Лесостроительное предприятие, 1977. 75 с.
- [3] Булавина Л.И., Рапопорт В.Л., Унанянц Н.Т. Архангельское. Краткий путеводитель. М., Московский рабочий, 1968. С. 96.
- [4] Безсонов С.В. Архангельское. Подмосковная усадьба. М. ГМУ «Архангельское», 2012. 416 с.
- [5] Архангельское. Краткий путеводитель. М., Московский рабочий, 1963. С. 48
- [6] Архангельское. Краткий путеводитель. М., Московский рабочий, 1961. С. 75.
- [7] Голицын Н.В. Род кн. Голицыных. СПб., 1892. Т. 1, с. 611.
- [8] Вениаминов Б. Архангельское, М., Мир искусства, 1904. № 2. С. 31–42.
- [9] Вергунов А.П., Горохов В.А. Русские сады и парки. М., Наука, 1987. С. 418.
- [10] Шамурин Ю.И. Подмосковные усадьбы. Ч. 1–4, М., Образование, 1912–1914. С. 271.
- [11] Карамзин Н.М. Путешествие вокруг Москвы. М., 1803. 352 с.
- [12] Булавина Л.И., Рапопорт В.Л., Унанянц Н.Т. Архангельское. Краткий путеводитель. М., Московский рабочий, 1974. С. 128.
- [13] Гесслер В. Архангельское. Краткий путеводитель. М. Изобразительное искусство, 1956. С. 64.
- [14] Иванова В.И.. Архангельское имение // Архив ГМУ «Архангельское». С. 34.
- [15] Научно-проектная документация по разработке проекта реставрации территории музея-усадьбы «Архангельское»: отдел капитального строительства и реставрации ФГБУ музея-усадьбы «Архангельское». М.: ООО «Русский сад им. В.А. Агальцовой», 2017. Раздел 2. Комплексные научные исследования. Книга 1. Пояснительная записка. 86 с.
- [16] Князь Феликс Юсупов. Мемуары. М., Захаров, 2001, 234 с.
- [17] Рассказы бабушки. Из воспоминаний пяти поколений, записанных и собранных ее внуком Д. Благово. Л., Наука, 1989. С. 172.
- [18] Корректировка проекта реконструкции регулярного парка музея-усадьбы «Архангельское»: отдел капитального строительства и реставрации ФГБУ музей-усадьба «Архангельское». М., ООО «Русский сад», 2001. С. 45.
- [19] Агальцова В.А. Сохранение мемориальных лесопарков. М., Лесная промышленность, 1980. С. 254.
- [20] Греч А.Н. Венки усадьбам. Памятники отечества, 1994. № 3–4. С. 37.

Сведения об авторах

Фролова Анна Владимировна — ландшафтный архитектор ФГБУК «Государственный музей-усадьба «Архангельское», vstile2012@yandex.ru

Леонова Валентина Алексеевна — канд. с.-х. наук, доцент кафедры ландшафтной архитектуры и садово-паркового строительства ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), leonovava@bk.ru

Поступила в редакцию 15.07.2020.

Принята к публикации 15.10.2020.

THE IMPERIAL ALLEY AND BYKOV GROVE IN MUSEUM-ESTATE «ARKHANGELSKOYE»: THE HISTORY OF CREATION, RESTORATION AND ADAPTATION TO MODERN CONDITIONS

A.V. Frolova¹, V.A. Leonova²

¹State Museum-Estate «Arkhangelskoye», 143420, Krasnogorsk district, village of Arkhangelskoye, Moscow reg., Russia

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

vstile2012@yandex.ru

Historical information about the owners, stages of development of the estate «Arkhangelskoye» and the creation of the Park is presented. Special attention is paid to the planning structure of the estate, its main compositional axis in the Northern part—the Imperial alley and the Bykov grove. The current state and problems of restoration of the Imperial alley and the possibility of adapting the Bykov grove to modern recreational conditions are considered in detail. The main wood assortment of the Bykov grove is indicated and the recommendations for care are given. For the first time, the archives of the estate Museum (projects in 1978, 2001, and 2017) were worked out all data about the Bykov grove and the Imperial alley are collected in chronological order and described in the article. The authors conducted the last research before the restoration and adaptation in 2018.

Keywords: the museum-estate, Arkhangelskoye, the main compositional axis, Imperial alley, the restoration, the palace, Bykov grove, the adaptation

Suggested citation: Frolova A.V., Leonova V.A. *Imperatorskaya alleya i Bykova roshcha v muzee-usad'be «Arkhangel'skoye»: istoriya sozdaniya, restavratsii i prispособleniya k sovremennym usloviyam* [The Imperial alley and Bykov grove in museum-estate «Arkhangelskoye»: the history of creation, restoration and adaptation to modern conditions]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 1, pp. 64–71. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-64-71

Reference

- [1] Bogovaya I.O., Fursova L.M. *Landshaftnoe iskusstvo* [Landscape art]. Moscow: Agropromizdat, 1988, p. 223.
- [2] *Proekt vosstanovleniya i rekonstruktsii parka muzeya-usad'by «Arkhangel'skoye» I etap: otdel kapital'nogo stroitel'stva i restavratsii FGBU muzey-usad'ba «Arkhangel'skoye»* [Project of restoration and reconstruction of the park of the museum-estate «Arkhangelskoye» Stage I: department of capital construction and restoration of the FSBI museum-estate «Arkhangelskoye»]. Moscow: Central Forestry Enterprise, 1977, 75 p.
- [3] Bulavina L.I., Rapoport V.L., Unanyants N.T. *Arkhangel'skoye. Kratkiy putevoditel'* [Arkhangelskoye. A short guide]. Moscow: Moscow worker, 1968, p. 96.
- [4] Bezonov S.V. *Arkhangel'skoye. Podmoskovnaya usad'ba* [Arkhangelskoye. Manor near Moscow]. Moscow: GMU «Arkhangelskoye», 2012, p. 416.
- [5] *Arkhangel'skoye. Kratkiy putevoditel'* [Arkhangelskoye. A short guide]. Moscow: Moscow worker, 1963, p. 48.
- [6] *Arkhangel'skoye. Kratkiy putevoditel'* [Arkhangelskoye. A short guide]. Moscow: Moscow worker, 1961, p. 75.
- [7] Golitsyn N.V. *Rod kn. Golitsynykh* [Rod of the book Golitsyn]. Saint Petersburg., 1892, t. 1, p. 611.
- [8] Veniaminov B. *Arkhangel'skoye. Mir iskusstva* [World of Art], 1904, no. 2, pp. 31–42.
- [9] Vergunov A.P., Gorokhov V.A. *Russkie sady i parki* [Russian gardens and parks]. Moscow: Nauka, 1987, p. 418.
- [10] Shamurin Yu.I. *Podmoskovnye usadby* [Moscow region]. Part. 1–4, Moscow: Education, 1912–1914, p. 271.
- [11] Karamzin N.M. *Puteshestvie vokrug Moskvy* [Travel around Moscow]. M., 1803, 352 p.
- [12] Bulavina L.I., Rapoport V.L., Unanyants N.T. *Arkhangel'skoye. Kratkiy putevoditel'* [Arkhangelskoye. A short guide]. Moscow: Moscow worker, 1974, p. 128.
- [13] Gessler V. *Arkhangel'skoye. Kratkiy putevoditel'* [Arkhangelskoye. A short guide]. Moscow: Fine Arts, 1956, p. 64.
- [14] Ivanova V.I. *Arkhangel'skoye imenie* [Arkhangelskoye estate]. Arkhiv GMU «Arkhangel'skoye» [Archives of the State Medical University «Arkhangelskoye»], p. 34.
- [15] *Nauchno-proektnaya dokumentatsiya po razrabotke projekta restavratsii territorii muzeya-usad'by «Arkhangel'skoye»: otdel kapital'nogo stroitel'stva i restavratsii FGBU muzeya-usad'by «Arkhangel'skoye»* [Scientific and design documentation for the development of a project for the restoration of the territory of the museum-estate «Arkhangelskoye»: department of capital construction and restoration of the FSBI of the museum-estate «Arkhangelskoye»]. Moscow: OOO «Russian garden im. V.A. Agaltsova», 2017. Section 2. Comprehensive scientific research. Book 1. Explanatory note, 86 p.
- [16] *Knyaz' Feliks Yusupov. Memuary* [Prince Felix Yusupov. Memoirs]. Moscow: Zakharov, 2001, 234 p.
- [17] *Rasskazy babushki. Iz vospominaniy pyati pokoleniy, zapisannye i sobrannye ee vnukom D. Blagovo* [Grandma's stories. From the memoirs of five generations, recorded and collected by her grandson D. Blagovo]. Leningrad: Nauka, 1989, p. 172.
- [18] *Korrektirovka projekta rekonstruktsii regul'yarnogo parka muzeya-usad'by «Arkhangel'skoye»: otdel kapital'nogo stroitel'stva i restavratsii FGBU muzey-usad'ba «Arkhangel'skoye»* [Correction of the project of reconstruction of the regular park of the museum-estate «Arkhangelskoye»: the department of capital construction and restoration of the FSBI museum-estate «Arkhangelskoye»]. Moscow: Russian Garden, 2001, p.45
- [19] Agal'tsova V.A. *Sokhraneniye memorial'nykh lesoparkov* [Preservation of memorial forest parks]. Moscow: Lesnaya prom-st, 1980, p. 254.
- [20] Grech A.N. *Venok usad'bam* [A wreath for estates]. Pamyatniki otechestva [Monuments of the Fatherland], 1994, no. 3–4, p. 37.

Authors' information

Frolova Anna Vladimirovna — Landscape architect of State Museum-Estate «Arkhangelskoye», vstile2012@yandex.ru

Leonova Valentina Alekseevna — Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), leonovava@bk.ru

Received 15.07.2020.

Accepted for publication 15.10.2020.

КОНСТРУКЦИЯ И УСТРОЙСТВО ЗЕЛЕННЫХ КРЫШ Ф. ХУНДЕРТВАССЕРА

Т.В. Киреева

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет», 603950, Нижний Новгород, ул. Ильинская, д. 65

tkireeva2005@yandex.ru

Представлены основные положения философии и теории интеграции растений в архитектуру на примере зданий, построенных по проектам Фриденсрайха Хундертвассера в виде лесных, травяных, луговых крыш или деревьев-«арендаторов». Указано их значение в улучшении экологии и эстетики города. Приведены данные их натурного обследования. Впервые в отечественной ландшафтной науке изучены и представлены данные по конструкциям и материалам зеленых крыш, применяемым с 1970-х гг. в целях реализации проектов Хундертвассера, представляющие собой как теоретический, так и практический интерес для развития этого направления ландшафтной архитектуры.

Ключевые слова: зеленые крыши Хундертвассера, травяные крыши, луговые крыши, лесные крыши, деревья-арендаторы, конструкция зеленых крыш

Ссылка для цитирования: Киреева Т.В. Конструкция и устройство зеленых крыш Ф. Хундертвассера // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 1. С. 72–80. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-72-80

Творчество австрийского архитектора и живописца Фриденсрайха Хундертвассера (Friedensreich Hundertwasser, 1928–2000 гг., настоящее имя — Фридрих Штовассер, Friedrien Stowasser), страстного борца за охрану окружающей среды, возвращение природы в город, представлено в России очень ограниченно. В литературных и научных источниках преобладают описания художественной деятельности [1] и неординарной архитектуры созданных им зданий [2, 3], противоречивость и сенсационность его действий [4] по продвижению своих философских взглядов, а также восхищенные отзывы публики и туристов, в которых постоянно рассматривается возможность произрастания деревьев как на фасадах, так и на крышах зданий.

Цель работы

Цель работы — изучение устройства зеленых кровель, за период конца 1970-х гг. — начала 2000-х гг. с позиции «зеленой» философии и «зеленой» архитектуры Ф. Хундертвассера, важного этапа для развития теории ландшафтной архитектуры, поскольку применяемые в тот период времени конструкции и материалы отличаются от современных простотой и надежностью, вызывая сегодня высокий научный интерес. Опыт архитектора может быть полезен и использоваться в настоящее время, что могло бы развенчать миф о сложности и дороговизне создания зеленых крыш и способствовало бы их широкому распространению.

Материалы и методы

Возвращение природы, лесов и деревьев в город возможно, по мнению Хундертвассера, через

озеленение крыш и фасадов, о чем он не только мечтал, но и последовательно шел к достижению своей цели.

Хундертвассер выступал за создание на крышах не садов, а лесов и даже ввел понятие «облесненных» крыш — an afforestation of the roof [5] (далее — лесных), где деревья, кустарники и травы местного ассортимента росли и развивались бы естественно, самосевом, без всякого дополнительного ухода.

Предметом проведенного исследования являются конструкции и устройство кровельного «пирога» зеленых крыш зданий Хундертвассера.

В ходе изучения были использованы следующие принципы научного анализа:

- исторический принцип, лежащий в основе исследования практик — архитектурной и ландшафтно-архитектурной в целях выявления общих закономерностей развития данной темы в хронологическом порядке;

- принцип комплексного рассмотрения темы, основанный на анализе литературных источников, проектных материалов, натурном обследовании и фотофиксации;

- принцип системного анализа, позволяющий получить более полные и глубокие знания о предмете изучения: истории изменения как архитектуры здания, так и возможности ее озеленения; применяемых конструкциях, представляющих собой сложную динамичную структуру, все элементы которой связаны между собой.

Результаты и обсуждение

Реализация смелых идей Хундертвассера по возвращению природы в города осуществлялась последовательно и с точки зрения классифика-



a

ции зеленых крыш [6] прошла несколько этапов: от зеленых плоских не эксплуатируемых крыш (здание завода Ригенталь), ступенчатых крыш и террас частного и общественного назначения (Дом Хундертвассера в г. Вена (рис. 1), зеленая цитадель г. Магдебург (рис. 2) — до крыш интенсивного типа с посадкой деревьев в насыпном грунте с учетом значительного уклона конструкции (дом-спираль в г. Дортмунд, дом Рональда Макдональда в г. Эссен, рис. 3).

Деревья на крышах и фасадах зданий первоначально были темой живописных работ Ф. Хундертвассера [7]. Затем вследствие деклараций и манифестов 1958 г., бичующих рационализм и жесткость архитектуры, появились на моделях-макетах, что наглядно демонстрировало обществу образ «домов, висящих над лугами» [8]. Деревья в городе «переместились» с улиц на крыши зданий, на специальные конструкции — пешеходные мосты, перекрывающие проезды в целях полного озеленения города [9]. Окончательно идея о возвращении природы в город была заявлена Ф. Хундертвассером в 1972 г. на телепередаче TV-Eurovisions-Sendung «Wünsch Dir was», где были сформулированы основные принципы его «зеленой» философии: зеленые лесные и луговые крыши (the high-rise meadow house or forest roof); фасады зданий с деревьями-«жильцами» (tree-tenants); дома природных форм наподобие глазной прорези (the Eye-slit-house) или спирали, а также предлагался



б

Рис. 1. Дом Хундертвассера в г. Вена (1985): а — внешний вид дома с зелеными террасами; б — дерево-«жильец» на фасаде дома (фото автора 2016 г.)

Fig. 1. Hundertwasser House in Vienna (1985): а — the house facade with green terraces; б — a tree-«tenant» on the facade of the house (photo by the author 2016)

новый тип заглубленного в землю дома-ямы (the pit house) [10].

Идея использования деревьев для озеленения фасадов здания появилась в манифесте «Деревья-жильцы» (1973 г.) [11], где Хундертвассер пишет: — «Дерево-жилец это посланник леса», который, по его мнению, платит арендную плату чистым воздухом, романтикой и тенью.

По мнению Хундертвассера, деревья-«жильцы» растут в отдельной комнате частной квартиры в специальных контейнерах, а их кроны могли бы выходить на фасад здания через оконный проем (см. рис. 1, б). Контейнеры должны выполняться в период строительства дома. Для гидроизоляции конструкции важно использовать пленку или слой резины Priell. В течение недели конструкция, заполненная водой, должна была продемонстрировать водонепроницаемость и только после этого можно было выполнять дальнейшие работы. На дно укладывался слой лесса, или пемзы, для удержания влаги, затем — растительный слой (торф и перегной), который заполнял емкость до уровня подоконника. Деревья с обхватом ствола до 20 см поднимались к месту посадки строительным краном. Крону дерева выпускали через оконный проем на фасад здания и фиксировали на первое время к переплету оконной рамы. Уход за деревом возлагался на жителей квартиры.

Первые жильцы-«арендаторы» и первая лесная крыша Хундертвассера появились только через 10 лет его неустанной борьбы в 1982 г.



а



б



в

Рис. 2. Зеленая цитадель Ф. Хундертвассера в г. Магдебурге: а — вид на здание и необычные крыши; б — вид на зеленую террасу с крыши дома; в — частная терраса (фото автора 2020 г.)

Fig. 2. F. Hundertwasser's Green citadel in Magdeburg: а — view of the building and unusual roofs; б — view of the green terrace from the roof of the house; в — private terrace (photo by the author in 2020)

на здании фабрики Розенталя в г. Зельб (Германия). Типичное железобетонное здание преобразовалось, согласно философии Хундертвассера, в кусочек естественного леса с деревьями и высокими травами [12]. В течение следующих 10 лет, мастер выполнил около 30 различных эскизов,

моделей и проектов зданий с луговыми и лесными крышами, но они не были реализованы.

Первое здание в гармонии с природой — Waldhaus, переименованное в дальнейшем в Дом Хундертвассера, было построено в г. Вене в период 1983–1985 гг. (см. рис. 1, а, б). Все смелые

идеи мастера по созданию лесных крыш-террас, оформлению фасада деревьями-«жильцами» были реализованы с помощью приглашенных специалистов. Первоначально (с 1979 г.) над проектом работал архитектор Йозеф Кравина (Josef Krawina), заложивший основные конструктивные и планировочные решения [13]. С 1980 г. работу продолжил австриец, архитектор 19 муниципального департамента Вены Петер Пеликан (Peter Pelikan, Magistratsabteilung 19), ставший с этого времени ведущим архитектором всех последующих построек и близким другом мастера.

Здание ступенчатой формы, расположенное на участке площадью 1092 м², имеет три общественных и 16 частных террас, общей площадью 920 м², а также недоступные зеленые зоны площадью 440 м² [14]. Таким образом, суммарная площадь крышного озеленения превышает площадь участка, отведенного под строительство, что соответствует главным принципам философии Хундертвассера.

Проект озеленения крыш и террас выполнял садовый архитектор Зепп Краточвилль (Sepp Kratochwil). Его идеи интеграции растений в архитектуру здания [15] были успешно применены при посадке 250 деревьев и кустарников на террасах и фасаде дома. Технология устройства зеленой кровли, предложенная З. Краточвиллем, демонстрирует ее устойчивость и надежность 35 лет. Посещение в 2016 г. и осмотр зеленых террас Дома Хундертвассера автором статьи подтверждает это.

Основа конструкции З. Краточвила — бетонная емкость («ванна»), имеющая скошенные края. Пять слоев битума изолируют конструкцию, затем идет слой бетона, по которому уложена корнезащитная фольга. Далее использованы два слоя пемзы для сбора воды и гравийный отсев для дренажа. Для закрепления дерева установлена специальная конструкция: две сетки с шагом 3×3 м из нержавеющей стали большего сечения, снизу к ней приварен треугольник из металлических брусков, к которому по углам крепится посадочный ком дерева в тканевой обвязке. Толщина растительного слоя в 1 м позволяет корням дерева свободно размещаться между ячейками сеток. Масса поднятой на террасы почвы составила 900 т. Такая конструкция надежно закрепляет и обеспечивает дальнейший рост дерева [16].

Хундертвассер выступал за постоянное развитие и обновление «третьей кожи» — жилища, где «обязательство дерева означает восстановление диалога с природой» [16]. На презентации своего проекта перед мэром г. Вены он утверждал: «Речь не идет о том, чтобы поместить одобренные растения в еще большем количестве в одобренные



а



б

Рис. 3. Дом Рональда Макдональда: а — фасад дома с зеленой крышей-пандусом; б — деревья и башня, венчающая крышу

Fig. 3. Ronald McDonald's House: а — the facade of the house with a green roof ramp; б — trees and a tower crowning the roof

вазы, ведра и кадки повсюду как декоративные предметы мебели. Также речь не идет о том, чтобы поставить еще больше газонов, обсуживающихся городом. Речь идет о том, чтобы помочь природе одичать и в городе». Этот тезис определяет жизнь растений на крыше — им не нужен садовник, они должны развиваться самостоятельно, выживать в сложных условиях, и заменяться естественным образом более устойчивыми растениями. В понимании Хундертвассера зеленая

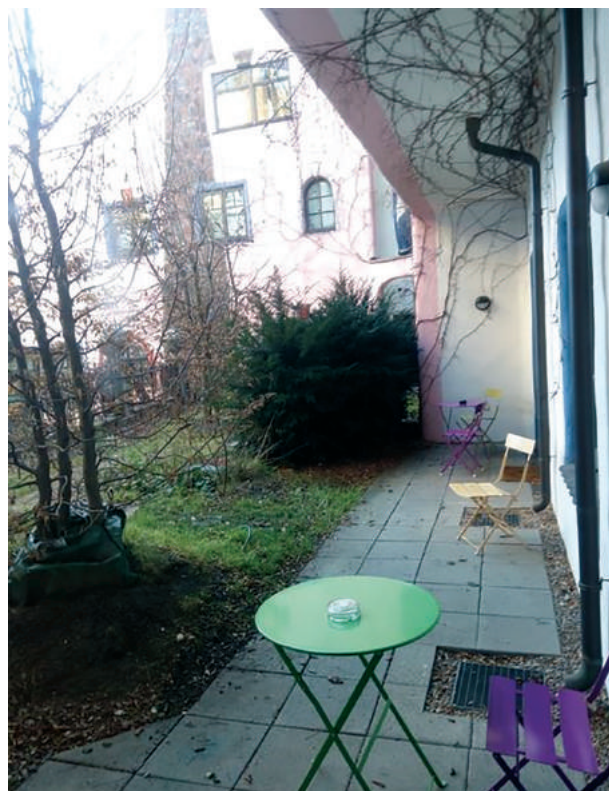


Рис. 4. Зеленая терраса второго этажа Зеленой цитадели
Fig. 4. Green terrace on the second floor of the Green Citadel

крыша дома — это не сад, а луговая, травяная или лесная крыша естественного поддержания.

Лесные крыши и террасы Waldhaus стали новой вехой в технологии устройства зеленой крыши. Ранее состав кровельного «пирога» был более природным, и по описаниям, приведенным в книге «Сады на крыше» (1962) немецких ученых Герды Голлвитцер и Вернера Версинга (G. Gollwitzer, W. Wersing) [17], состоял из перегноя, разделительного слоя соломы и перлитового кокса в качестве дренажного и влагоудерживающего слев.

Устройство зеленой кровли с применением насыпного грунта на больших площадях кровель и террас представляет значительный интерес для изучения, создания и эксплуатации подобной конструкции. Технология З. Краточвиля была основана на новых, искусственных материалах, пришедших на смену природным.

Успех венского проекта повлиял на развитие крышного озеленения. В Швейцарии, Франции и особенно в Германии газоны и деревья все чаще стали украшать крыши и террасы общественных и жилых зданий. С конца 1970-х гг. в Европе, в частности в Германии, начались разработки новых кровельных материалов. К этому времени в районе г. Штутгарта свои штаб-квартиры открыли фирмы Optigrun, Optima, Zinco [18], цель работы которых — выпуск кровельных материалов для зеленых крыш.

В последующие годы энергия Хундертвассера, отвергавшего «прямую линию», была направлена на поиски новой природной формы архитектуры здания.

Проектирование и строительство в 1998–2000 г. дома-спирали, где за образ была взята улитка передвигающаяся «по нежной зеленой долине» [16] в г. Дармштадте (Германия) стало практическим откликом Хундертвассера на теоретические идеи возникшего нового направления архитектурной бионики. Оригинальность самой формы здания-пандуса, закручивающегося вокруг двора от уровня тротуара до высоты девятого этажа с лесной крышей, привлекала своей необычностью и смелостью решения. Улитка была любимой темой художественных работ Ф. Хундертвассера [7]. Строительство здания возглавил архитектор Хайнц Шпрингман (Heinz Springmann) [19], который с успехом справился со сложной творческой работой проектирования и строительства необычного здания.

Конструкцию и озеленение крыши площадью 4500 м² выполнила фирма Optigrün-Partnerbetrieb Säger (Darmstadt) [20]. Это была кровля нового поколения системы «Ландшафтная крыша» (Landschaftsdach), где в качестве разделительных, дренажных и защитных материалов применялись запатентованные искусственные материалы специального назначения) [20].

Возведение жилого комплекса для г. Магдебурга (Германия) имело долгую историю проектирования (1996–1990 гг.), и на него были возложены большие надежды мастера, который писал в июле 1999 г. из своего дома в Новой Зеландии, что магдебургский проект станет «моим самым прекрасным и лучшим сооружением», и дал ему имя — «Зеленая цитадель» (Grünen Zitadelle) [21]. Строительство здания под руководством П. Пеликана состоялось только в период 2004–2005 г., уже после кончины Ф. Хундертвассера в 2000 г. На площади земельного участка в 5408 м² было построено необычное радостное розовое здание ступенчатой формы с башнями и двумя внутренними дворами (см. рис. 2, а).

Посещение террас и крыш Зеленой цитадели в начале 2020 г. дало возможность осмотреть и оценить оригинальную архитектуру здания, интерьеры, разнообразные зеленые террасы и крыши башен (см. рис. 2, б, в), участки плоских террас и террас со значительным уклоном [12].

Плоские террасы принадлежат частным квартирам и отелю «Art-hotel». Это небольшие сады с зелеными лужайками для отдыха (см. рис. 2, б, в; рис. 4), с деревьями различных видов — кленами, рябинами, сиренью, елями и соснами, а также цветущими многолетниками и травами. Деревья высотой до 4 м имеют густую крону и про-

изводят впечатление естественного леса (рис. 5). Дорожки и небольшие площадки выполнены из природного камня или плитки небольшого размера по грунту с зелеными травяными швами (см. рис. 4).

Некоторые квартиры имеют участки со сложным рельефом на двух уровнях, со значительным уклоном грунта с травянистым покрытием и посадками различных деревьев (граба, рябины, сосны). Для подъема служат лестницы с пошаговыми плитами из природного камня. Состояние частных террас — отличное, что, к сожалению, не скажешь об участках вокруг дома, примыкающих к уровню тротуара. Они представляют собой земляное покрытие с остатками травостоя между деревьями. Такое положение является результатом туристической популярности и активности, желание все ощутить на собственной «второй коже» (рис. 6).

Всего на террасах и откосах комплекса было высажено 171 дерево, 264 кустарника, 9214 многолетников, 10 тыс. луковичных [21]. Зеленая цитадель, построенная в историческом центре рядом с главным собором и зданием администрации города, своим необычным видом служит позитивным примером архитектуры нового направления, демонстрирует возможности зеленых крыш, их устойчивость и стала туристической «меккой», активно пополняющей казну города.

Уникальным и последним сооружением с травяной эксплуатируемой крышей, выполненным по проекту Ф. Хундертвассера, стал Дом Рональда Макдональда (Ronald McDonald Hundertwasser Naus) для семей, чьи дети проходят лечение в университетской клинике г. Эссена (Германия). Работы по возведению дома вновь шли под руководством архитектора Х. Шпрингмана.

Проект устройства и озеленения крыши выполняла специализированная фирма — Firma Grün+Dach и ее инженер Юрген Куиндо (Jürgen Quindeau) [22].

Сложность работы заключалась в том, что крыша, имеющая переменную ширину от 8...9 м вначале, затем расширялась до 10...12 м и постепенно поднималась на высоту 15 м с уклоном до 35° — предельным для зеленых крыш. Необходимо было найти решения для разных уклонов крыши, сохраняя единое бетонное основание с битумной гидроизоляцией (рис. 7).

Далее укладывались следующие слои кровельного «пирога» [23]: защитный ковер из полиэфирного флиса с плотностью 500 г/м², который обеспечивает защиту от механических повреждений и сдвига наклонной силы, а также отводит избыточный объем дождевой воды. В растительном слое прокладывался полипропиленовый фильтрующий материал с прочностью на сжатие 250 кН/м², позволяющий выполнять дорожки и площадки на одном уровне с озеленением; дренажный материал — известковый гравий фракции 2...5 мм.



Рис. 5. Хвойные растения на верхней террасе Зеленой цитадели (январь 2020 г.)

Fig. 5. Conifers on the upper terrace of the Green Citadel (January 2020)



Рис. 6. Состояние деревьев и травянистого покрытия на наклонном участке кровли при входе в здание Зеленой цитадели

Fig. 6. Condition of trees and grassy cover on a sloping roof section at the entrance to the Green Citadel building



а



б



в

Рис. 7. Дом Рональда Макдональда. Детали устройства конструкции зеленой крыши: а — посадочный ком саженца с ремнями для дальнейшей фиксации; б — участок кровли с уклоном от 20° — 30° усилен растровыми решетками; в — стабилизирующее джутовое покрытие в верхнем слое покрытия [23]

Fig. 7. Ronald MacDonald's House. Details of the construction of the green roof: а — planting ball of the seedling with belts for further fixation; б — a roof section with a slope of 20° — 30° is reinforced with raster gratings; в — stabilizing jute coating in the upper layer of the coating [23]

Были также разработаны особые конструкции для участка с подъемом крыши до 20°. Для удержания кровельного «пирога» в конструкцию были заложены поперечные пороги (шпалы). К ним были закреплены перфорированные дренажные элементы высотой 75 мм из пенополистирола, пропускающие избыток воды в нижнюю часть крыши, где был создан специальный водоприемный декоративный пруд.

Следующий участок крыши с уклоном от 20...35° по всей поверхности был усилен растровыми решетками размером 54×54 см и высотой 10 см с центральным стабилизирующим стержнем (HD-PE) (рис. 7, б) [23]. К этой решетке закреплялись ремни посадочного кома саженца. Такое надежное крепление не требует дополнительных растяжек для удержания дерева, и посадки смотрятся естественно.

Для почвенного слоя толщиной 60 см по всей кровле использовался специальный субстрат, изготовленный на основе переработанного глиняного кирпича, обогащенного зрелым компостом и глиной. Для стабилизации роста и укоренения растений было выполнено покрытие из специальной ткани 100%-го джута с размером отверстий 3...4 мм (см. рис. 7, в) [23].

Для озеленения крыши использовали местный ассортимент растений. Всего было высажено 50 деревьев высотой около 4 м, с окружностью ствола 20 см: клен, липа, рябина, граб, а также яблони, вишня и груша; более 130 кустарников: лесной орех, кизил, калина, сирень, облепиха, жасмин и роза яблочная [22]. Для создания цветущего луга была выбрана специальная семенная смесь. Зеленая крыша такой конструкции не требует дополнительного ухода, кроме полива в первые дни посадки. Растения за прошедшие 15 лет укоренились, заметно выросли, набрали силу. В настоящее время лесная крыша визуально «слилась» с древесостоем, окружающим здание, стала частью общего пейзажа.

Выводы

Представленные в статье материалы свидетельствуют о том, что позиция Ф. Хундертвассера по зеленому освоению крыш, террас и фасадов, заявленная еще в начале 1970-х гг., актуальна сегодня и имеет перспективу дальнейшего развития. Состояние лесных и луговых крыш за прошедший почти 35-летний период демонстрирует устойчивое разнообразие растительного сообщества, что говорит о высоком профессиональном уровне проектирования и строительства конструкций, принятых технологических приемов посадки и выращивания деревьев на крышах в насыпном грунте.

Согласно философии Фриденсрайха Хундертвассера растения на крышах должны развиваться

естественно: расти, изменять свою форму, гибнуть, заменяться другими растениями из окружающей среды — природа на крыше должна быть продолжением природы окружающих полей и лесов этой местности. Идея малоуходных посадок, высказанная в свое время Хундертвассером, также должна быть изучена и применена в озеленении крыш и современных объектов ландшафтной архитектуры.

Данное исследование представляет научный и практический интерес для теории и истории ландшафтной архитектуры, так как открывает новый систематизированный материал по творчеству Ф. Хундертвассера касательно продвижения его «зеленой» философии и развития зеленых кровель.

Результаты исследования могут найти свое применение в теории и практике подготовки специалистов направления «Ландшафтная архитектура. Дизайн архитектурной среды». Анализ состава кровельного пирога зеленой крыши будет полезен в практической деятельности ландшафтных архитекторов.

Список литературы

- [1] Ранд Г. Хундертвассер. М.: Арт-Родник, 2005. 200 с.
- [2] Коновалова Н. Великие архитекторы. Фриденсрайх Хундертвассер. Т. 7. М.: ИД Комсомольская правда, 2018. 73 с.
- [3] Чжане Ю., Маклакова Т.Г. Образцы западноевропейской архитектуры. М.: Ассоциация строительных вузов, 2008. 196 с.
- [4] Кузнецова Г.Н. О человеке и человеческом в творческой концепции Фриденсрайха Хундертвассера (1928–2000) // Дом Бурганова. Пространство культуры, 2015. № 4. С. 42.
- [5] Hundertwasser 1928–2000, Catalogue Raisonné, vol. 2. Cologne: Taschen, 2002, p. 178.
- [6] Киреева Т.В. Архитектурно-ландшафтная организация зеленой эксплуатируемой кровли. М.: Триумф, 2019. 112 с.
- [7] Furst A.C., Truppe D. The Yet Unknown Hundertwasser. Priestel Publ., 2009, 295 p.
- [8] Архитектура. Дома, висящие над лугами. URL: <http://www.hundertwasser.ru/architecture/others/pages/1972-cat709-I-arch17-I.htm> (дата обращения 20.02.2020).
- [9] Hundertwasser. Architecture. URL: www.worldheritage.org/articles/eng/Hundertwasser (дата обращения 24.02.2020).
- [10] Taschen A. Fürst A. Hundertwasser Architecture. Köln: Taschen, 1999, p. 320.
- [11] Baum mieter-Brief. Tree-Tenant Letter. URL: http://www.hundertwasser.ru/philosophy/pages/1973--Tree-Tenant_Letter--RUS--Hundertwasser.html (дата обращения 20.02.2020).
- [12] Киреева Т.В. Зеленые крыши Ф. Хундертвассера // Ландшафтная архитектура и формирование комфортной городской среды. Материалы XVI региональной научно-практической конференции: сб. тр. / под ред. О.П. Лавровой. Н. Новгород: ННГАСУ, 2020. С. 44–48.
- [13] Josef Krawina. URL: <http://www.hundertwasserhaus.info/entstehungsgeschichte.html> (дата обращения 02.03.2020).
- [14] The Brick Construction. URL: <http://www.hundertwasser-haus.info/en/blog/2011/07/19/the-brick-construction/> (дата обращения 04.03.2020)
- [15] Kratochwill Sepp. Integration von Pflanzen im Wohnbau. Biologische Architektur. Verlag: Orac, 1983.
- [16] The House Should Not Be Measured by Normal Standards. URL: <http://www.hundertwasser-haus.info/en/blog/2011/07/19/the-house-should-not-be-measured-by-normal-standards/> (дата обращения 12.03.2020).
- [17] Gollwitzer G., Wersing W. Dachgärten und Dachterrassen. Mit zahlreichen Abbildungen, München, Georg D.W. Callwey Verlag, 1962, 120 p.
- [18] Lopez F.S. Del Dachgärtenal Greenroofscape (1970-2005). Aportación a la Historia Reciente Delpaisaje Urbano. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/71010021.pdf> (дата обращения 08.04.2020).
- [19] Architectural H. Springmann. URL: <https://springmann-architektur.de/> (дата обращения 08.04.2020).
- [20] Waldspirale. URL: <http://www.faszination-dachbegruenung.de/projekte/waldspirale-darmstadt/51> (дата обращения 20.02.2020).
- [21] Die Grune Zitadelle von Magdeburg. Eine Vision wird Zukunft. URL: <https://kunstreich-md.de/zeitstrahl-hundertwasser/> (дата обращения 15.03.2020).
- [22] Green Roofs meet Fast Food: The Ronald McDonald Hundertwasser House in Essen, Germany. URL: <https://www.solaripedia.com/files/939.pdf> (дата обращения 18.04.2020).
- [23] Dachbegrünung auf dem Ronald-McDonald-Haus Essen. URL: <http://www.gruenunddach.de/pdf/hundertwasser14-16.pdf> (дата обращения 18.04.2020).

Сведения об авторе

Киреева Татьяна Валентиновна — канд. филос. наук, доцент кафедры ландшафтной архитектуры и садово-паркового строительства ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет», архитектор I категории, tkireeva2005@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.06.2020.

Принята к публикации 10.08.2020.

CONSTRUCTION AND DESIGN OF F. HUNDERTWASSER GREEN ROOFS

T.V. Kireeva

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 65, Ilyinskaya st., 603950, Nizhny Novgorod, Russia
tkireeva2005@yandex.ru

The article presents the main provisions of the philosophy and theory of plant integration into the architecture of the Friedensreich Hundertwasser building: forest, grass, meadow roofs, tenant trees. Indicated on their purpose and role in improving the ecology and aesthetics of the city. Data from a field survey of the green roofs of famous Hundertwasser buildings are given. For the first time in domestic landscape science, data on the structures and materials of green roofs used since the 70-s of the last century for the implementation of Hundertwasser projects has been studied and presented, which is of both theoretical and practical interest for the development of this area of landscape architecture.

Keywords: green roofs of Hundertwasser, grass roofs, meadow roofs, forest («wooded») roofs, tenant trees, construction of green roofs

Suggested citation: Kireeva T.V. *Konstruktsiya i ustroystvo zelenykh krysh F. Khundertvassera* [Construction and design of F. Hundertwasser green roofs]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 1, pp. 72–80.
DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-72-80

References

- [1] Rand G. *Khundertvasser* [Hundertwasser] M. : Art-Rodnik, 2005, 200 p.
- [2] Konovalova N. *Velikiye arkhitektory. Fridensraykh Khundertvasser. Tom 7* [Great architects. Friedensreich Hundertwasser. Volume 7]. Moscow: ID Komsomol'skaya pravda [Publishing House Komsomolskaya Pravda], 2018, 73 p.
- [3] Chzhane Yu., Maklakova T.G. *Obraztsy zapadnoyevropeyskoy arkhitektury* [Samples of West European Architecture]. Moscow: Assotsiatsiya stroitel'nykh vuzov, 2008, 196 p.
- [4] Kuznetsova G. N. *O cheloveke i chelovecheskom v tvorcheskoy kontseptsii Fridensraykha Khundertvassera (1928–2000)* [About man and the human in the creative concept of Friedensreich Hundertwasser (1928–2000)]. Dom Burganova. Prostranstvo kul'tury [Burganov House. The space of culture], 2015, no. 4, p. 42.
- [5] Hundertwasser 1928–2000, Catalogue Raisonné, vol. 2. Cologne: Taschen, 2002, p. 178.
- [6] Kireyeva T.V. *Arkhiturno-landshaftnaya organizatsiya zelenoy ekspluatiruyemoy krovli* [Architectural and landscape organization of a green exploited roof]. Moscow: Triumf, 2019, 112 p.
- [7] Furst A.C., Truppe D. *The Yet Unknown Hundertwasser*. Priestel Publ., 2009, 295 p.
- [8] *Arkhitectura. Doma visyashchiye nad lugami* [Architecture. Houses hanging over the meadows]. Available at: <http://www.hundertwasser.ru/architecture/others/pages/1972-cat709-I-arch17-I.htm> (accessed 20.02.2020).
- [9] Hundertwasser. Architecture. Available at: <http://www.worldheritage.org/articles/eng/Hundertwasser> (accessed 24.02.2020).
- [10] Taschen A. Fürst A. *Hundertwasser Architecture*. Koln: Taschen, 1999, p. 320.
- [11] Baum mieter-Brief. Tree-Tenant Letter. Available at: http://www.hundertwasser.ru/philosophy/pages/1973--Tree-Tenant_Letter--RUS--Hundertwasser.html (accessed 20.02.2020).
- [12] Kireyeva T. V. *Zelenyye kryshi F. Khundertvassera* [Green roofs of F. Hundertwasser]. *Landshaftnaya arkhitektura i formirovaniye komfortnoy gorodskoy sredy. Materialy KHVI regional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Landscape architecture and the formation of a comfortable urban environment. Materials of the XVI regional scientific-practical conference]. N. Novgorod: NNGASU, 2020, pp. 44–48.
- [14] The Brick Construction. Available at: <http://www.hundertwasser-haus.info/en/blog/2011/07/19/the-brick-construction/> (accessed 04.03.2020).
- [15] Kratochwill Sepp. *Integration von Pflanzen im Wohnbau*. Biologische Architektur. Verlag: Orac, 1983.
- [16] The House Should Not Be Measured by Normal Standards. Available at: <http://www.hundertwasser-haus.info/en/blog/2011/07/19/the-house-should-not-be-measured-by-normal-standards/> (accessed 12.03.2020).
- [17] Gollwitzer G., Wersing W. *Dachgärten und Dachterrassen*. Mit zahlreichen Abbildungen, München, Georg D.W. Callwey Verlag, 1962, 120 p.
- [18] Lopez F.S. *Del Dachgärtenal Greenroofscape (1970–2005)*. Aportación a la Historia Reciente Delpaisaje Urbano. Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/71010021.pdf> (accessed 08.04.2020).
- [19] Architectural H. Springmann. Available at: <https://springmann-architektur.de/> (accessed 08.04.2020).
- [20] Waldspirale. Available at: <http://www.faszination-dachbegruenung.de/projekte/waldspirale-darmstadt/51> (accessed 20.02.2020).
- [21] Die Grune Zitadelle von Magdeburg. Eine Vision wird Zukunft. Available at: <https://kunstreich-md.de/zeitstrahl-hundertwasser/> (accessed 15.03.2020).
- [22] Green Roofs meet Fast Food: The Ronald McDonald Hundertwasser House in Essen, Germany. Available at: <https://www.solaripedia.com/files/939.pdf> (accessed 18.04.2020).
- [23] Dachbegruenung auf dem Ronald-McDonald-Haus Essen. Available at: <http://www.gruenunddach.de/pdf/hundertwasser14-16.pdf> (accessed 18.04.2020).

Author's information

Kireeva Tat'yana Valentinovna — Cand. Sci. (Philosophy), Associate Professor of the Chair of Landscape Architecture of the NNGASU, Architect I category, tkireeva2005@yandex.ru

Received 15.06.2020.

Accepted for publication 10.08.2020.

МИКОЛИЗ ДРЕВЕСИНЫ, ЕГО ПРОДУКТЫ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

III. ФИЗИОЛОГИЯ И БИОХИМИЯ МИКОЛИЗА 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

Представлена третья часть цикла «Миколиз древесины, его продукты и их использование», первая и вторая — опубликованы в журнале «Лесной вестник / Forestry Bulletin» т. 24, № 2, № 4, 2020. Рассмотрены физиология миколиза древесины под действием экзоферментных систем дереворазрушающих грибов, процессы образования «бурых», «белых» и «пестрых гнилей» на фоне биохимических процессов разрушения компонентов лигноуглеводного комплекса древесинного вещества. Проанализированы изменения микроструктуры и химического состава древесины в процессе миколиза и их влияние на физико-химические свойства микологически разрушенной древесины.

Ключевые слова: целлюлолитические ферменты, лигнолитические ферменты, ферментативный гидролиз, биоделигнификация

Ссылка для цитирования: Кононов Г.Н., Веревкин А.Н., Сердюкова Ю.В., Зайцев В.Д. Миколиз древесины, его продукты и их использование. III. Физиология и биохимия миколиза древесины // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 1. С. 81–88. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-81-88

Физиологический механизм микологического разрушения древесины различными ксилитами отличается друг от друга вследствие специфичности ферментативных систем, выделяемых их гифами.

Так, в древесине пораженной грибами «бурой гнили», клеточные стенки разрушаются более или менее равномерно и растрескиваясь утончаются. Возбудители «бурой гнили» проникают в полости клеток древесины из сердцевинных лучей отдельными разветвленными гифами. Распространяясь в клеточной стенке, они сначала вызывают растрескивание внутреннего слоя вторичной стенки, его утончение со стороны полости клетки, а в дальнейшем разрушают средний и наружные слои [1]. В результате протекания этих процессов от клетки остается растрескавшаяся тонкая первичная стенка и истинная срединная пластинка.

При действии грибов «белой» и «пестрой» гнили процесс делигнификации начинается с проникновения их гифов во внутреннюю полость клетки с образованием микроотверстий в ее стенке вследствие действия ферментов, выделяемых гифами. В дальнейшем эти отверстия значительно расширяются и позволяют многим гифам проникнуть в глубокие слои стенки вплоть до срединной пластинки. После этого делигнификация продолжается и сопровождается набуханием и отделением внутренних слоев клеточной стенки. Постепенно происходит расслоение клеточной стенки по всей ее толщине и заполнение ее фрагментами частей полости клетки. В завершении процесса делигнифицируются срединные пластинки и происходит мацерация клеток, причем разложение наблюдается на значительном

удалении от гифов, что свидетельствует о высокой диффузионной способности лигнолитических ферментов гриба [2].

Цель работы

Цель работы — анализ физиологических процессов биохимического разрушения древесины под действием экзоферментных систем дереворазрушающих грибов и их влияния на компонентный состав древесины и химическую природу ее основных компонентов.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования использовали древесину ели, пораженную «бурой гнилью», и древесину березы, пораженную «белой гнилью» конечных стадий развития. Анатомические изменения микологически разрушенной древесины изучали методами электронной микроскопии. Структуру поверхности исследуемых объектов определяли с помощью сканирующего электронного микроскопа Phenom G2 pro, который позволяет получать изображения с увеличением в диапазоне от 80 до 45 000 раз и разрешением до 25 нм, ускоряющим напряжением 5 кВ, разрешением изображения от 456×456 до 2048×2048 пикселей, и потребляемой мощностью до 300 Вт.

На микрофотографиях «белой гнили» древесины березы, полученных при увеличении в 2000 раз, отчетливо проявляется структура клеточных стенок волокон либриформа, разрушенных под действием ферментов гриба. (рис. 1). Внутренние поверхности этих клеток имеют густые круглые перфорации как следствие проникновения гифов гриба внутрь клеточной стенки со стороны полости клетки.



Рис. 1. Электронная микрофотография внутренней поверхности волокон либриформа древесины березы, пораженной грибами «белой гнили» (ув. 2000×)

Fig. 1. Electron micrograph of the inner surface of the libriform of the birch wood-blue afflicted with «white rot» fungi (2000× magnification)

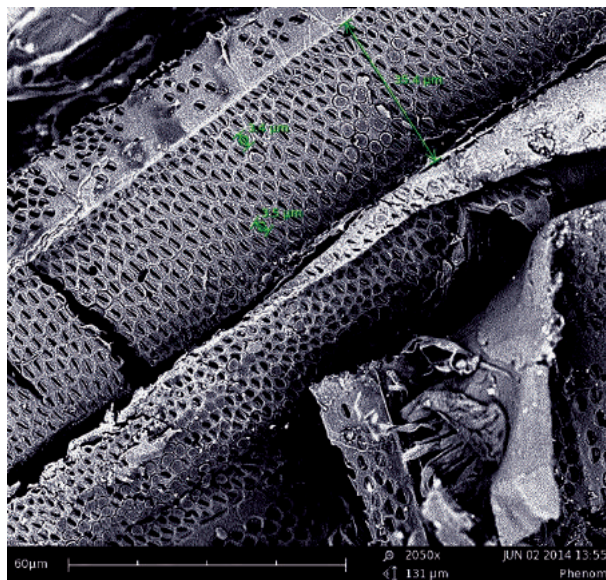


Рис. 2. Электронная микрофотография внешней поверхности волокон либриформа древесины березы, пораженной грибами «белой гнили» (ув. 2000×)

Fig. 2. Electron micrograph of the outer surface of the libriform fibers of the birch wood affected by the «white rot» fungi (2000× magnification)

Внешние поверхности волокон либриформа отличаются более узкими щелевидными перфорациями по сравнению с внутренними, и менее разрушенной структурой клеточной стенки благодаря большому содержанию лигнина в зоне ее примыкания к истинной срединной пластинке (рис. 2). Такой характер перфорации говорит о том, что разрушение древесины ферментами грибов «белой гнили» происходит достаточно интенсивно в зонах клеточной стенки с меньшим содержанием лигнина (внутренняя поверхность волокон либриформа) по сравнению с зонами с его большим содержанием (внешняя поверхность волокон либриформа).

Ферментами гриба легко делигнифицируется внутренний слой вторичной стенки, содержащий всего лишь несколько процентов лигнина, и менее интенсивно — внешний ее слой и первичная стенка с большим содержанием лигнина (от 30 до 70 %). В результате этого осуществляется доступность лигнолитических ферментов, выделяемых гифами гриба к истинной срединной пластинке, содержащей до 90 % лигнина, и происходит ее разрушение, а также мацерация клеток [3].

Сильно разрыхленная анатомическая структура древесины с «белой гнилью» с интенсивно перфорированными клеточными стенками позволяет предположить высокую гидрофильность и склонность к фибриллованию, доступность для проникновения различного рода реагентов и повышенную реакционную способность ее делигнифицированной полисахаридной матрицы, что делает

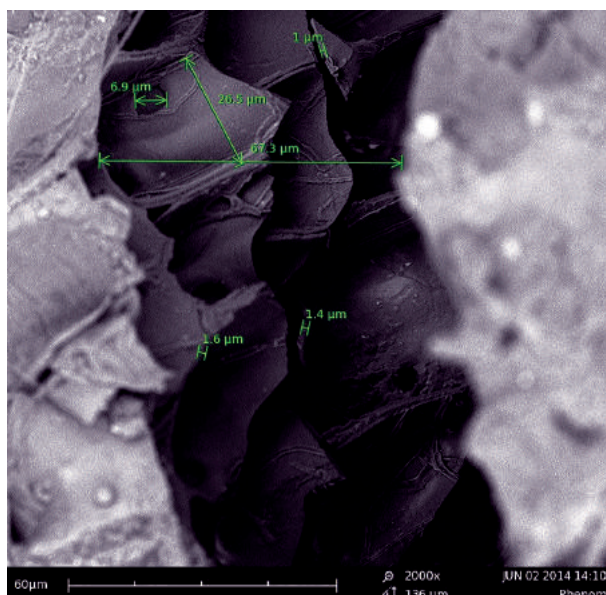


Рис. 3. Электронная микрофотография лигнифицированных трахеид древесины ели, пораженной грибами «бурой гнили» (ув. 2000×)

Fig. 3. Electron micrograph of lignified tracheids of spruce wood affected by «brown rot» affected by mushrooms (2000× magnification)

возможными ее использование в качестве волокнистого полуфабриката и химического сырья.

Что касается древесины ели, пораженной грибами «бурой гнили», то в этом случае имеет место обратная картина (рис. 3). Углеводные компоненты клеточных стенок интенсивно деструктурируются под действием целлюлолитических ферментов

гриба, разрушающих всю тонкую структуру клеточных стенок трахеид вплоть до сложных срединных пластинок, которые сохраняют анатомическое строение древесины. Однако их малая толщина и почти полное отсутствие в них целлюлозной матрицы обуславливают низкую прочность и высокую хрупкость такой древесины (см. рис. 3) [4]. Развитая внутренняя поверхность древесины с «бурой гнилью» позволяет предположить возможность ее использования в качестве сырья для получения сорбционных систем, а ее легкая гомогенизация, которая образуется вследствие высокой хрупкости — в качестве активного компонента в композиционных материалах.

Результаты и их обсуждение

Результаты химического анализа древесины, пораженной грибами «бурой гнили», свидетельствуют о возрастающей потере полисахаридов (табл. 1), а пораженной грибами «белой гнили» — лигнина, в особенности на начальных стадиях миколиза (табл. 2).

При образовании «бурой гнили» целлюлоза разрушается дифференцированным действием целлюлолитических ферментов постадийно (рис. 4).

Трансферазы разрушают кристаллическую структуру целлюлозы, вызывая набухание и расщепление некоторых гликозидных связей. Эндоглюконазы действуют на цепи целлюлозы в случайных местах, что приводит к возникновению новых центров для деполимеризующего действия целлобиогидралазы и глюкогидралазы, которые деполимеризуют образующиеся олигосахариды с конца цепей [5].

Ферменты, расщепляющие гемицеллюлозы, также состоят из разных компонентов. Так, из гриба «бурой гнили» *Tyromyces palustris* были выделены различные β-ксилаказы, β-манназы и β-маннозиды, а из плесневого гриба *Aspergillus niger* — α-галактозидаза и β-маннозидаза и другие ферменты. Перечисленные ферменты имеют тенденцию атаковать макромолекулы гемицеллюлоз по закону случая — не только на участках без боковых ответвлений, но и с такими ответвлениями. В продуктах деструкции ксиланов были найдены не только ксилоза и ксилобиоза, но и 4-О-метилглюкуроноксилобиоза и 4-О-метилглюкуроноксилотриоза [6].

В результате накопления в микологически разрушенной древесине продуктов распада углеводов редуцирующая способность ее значительно повышается, медное число составляет 7...13 % в отличие от здоровой, в которой оно 3,2...3,5 % [7].

После частичного разрушения древесины грибами «бурой гнили» остающийся химически измененный биолгнин становится растворимым

Т а б л и ц а 1

Относительные потери основных компонентов древесины пораженной грибами «бурой гнили», %

Relative losses of the main components of wood affected by «brown rot» fungi, %

Древесина	Общая потеря массы	Лигнин	Целлюлоза	Маннаны	Ксиланы
Ель*	10	9	12	14	18
	19	4	22	47	37
	43	11	55	80	65
Сосна**	9	—	13	25	1
	24	2	29	58	26
	45	4	68	81	69

* грибы *Cleophyllum trabea*.
** грибы *Poria placenta*.

Т а б л и ц а 2

Относительные потери основных компонентов древесины, пораженной грибами «белой гнили» *Coridius versicolor*, %

Relative losses of the main wood components of wood affected by the fungus «white rot» *Coridius versicolor*, %

Древесина	Общая потеря массы	Лигнин	Целлюлоза	Маннаны	Ксиланы
Ель*	13	27	4	13	13
	22	33	17	22	21
	43	52	43	47	47
Сосна*	21	31	20	26	26
	36	39	39	54	39

Т а б л и ц а 3

Состав лигнинов здоровой и пораженной грибами «бурой гнили» *Gloephyllum trabeum* древесины ели

The composition of healthy spruce wood lignin and «brown rot» affected by fungi *Gloephyllum trabeum*

Образец лигнина	Массовая доля, %			Полуэмпирическая формула
	С	Н	О	
ЛМД здоровой древесины	62,85	6,08	31,07	$C_9H_{8,66}O_{2,75}(OCH_3)_{0,92}$
ЛМД древесины с «бурой гнилью»	58,98	5,31	35,73	$C_9H_{8,44}O_{3,75}(OCH_3)_{0,61}$

в диоксане. Он характеризуется пониженным содержанием углерода и водорода и повышенным — кислорода, вследствие увеличения содержания суммарных гидроксидов и других кислородсодержащих групп (табл. 3) [8].

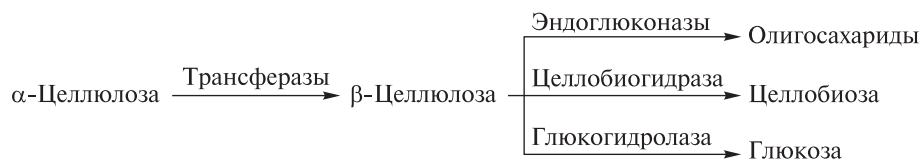


Рис. 4. Схема разрушения целлюлозы под действием целлюлолитических ферментов
 Fig. 4. Scheme of cellulose destruction under the influence of cellulolytic enzymes

Следовательно, основными являются реакции окислительной деструкции и деметилирования лигнина. Окисление приводит к образованию значительных количеств CO₂ с потерей углерода пропановых цепей и метоксильных групп, но при этом потеря массы частично компенсируется введением кислорода в структуру лигнина. Химические изменения компонентов древесины с «бурой гнилью» дают возможность предположить вероятное ее использование в качестве источника полупродуктов и активного наполнителя [8].

Ферменты грибов «белой гнили» деструктурируют в первую очередь лигнин, но также действуют на гемицеллюлозы и даже целлюлозу [9].

Эти ферменты относятся к группе пероксидаз. Пероксидазы — ферменты класса оксидоредуктаз, которые катализируют окисление с помощью H₂O₂ при разложении органических и неорганических веществ. Основным ферментом разрушения лигнина является лигнинпероксидаза. Его уникальная черта заключается в способности одноэлектронно окислять широкий круг диметоксифенильных субстратов с образованием катионрадикальных промежуточных соединений [10].

Лигнинпероксидазу считают ключевым ферментом в окислении лигнина до катионрадикалов, подвергающихся затем серии неферментативных реакций, включающих в себя расщепление С-С и С-О связей и фрагментацию трехмерной сетки лигнина.

Под действием ферментов грибов «белой гнили» в лигнине увеличивается содержание кислорода, за счет появления дополнительных карбонильных, а также карбоксильных групп, и уменьшается содержание алифатических гидроксильных. Содержание фенольных гидроксильных может и возрасти и понизиться. Значение отношения кислорода к углероду увеличивается, а водорода к углероду понижается как и содержание метоксильных групп (табл. 4) [11].

Увеличение содержания кислорода происходит в результате окисления углеродных атомов в α-положении (рис. 5) и окислительной деструкции связей между α- и β-углеродными атомами пропановой цепи (рис. 6) [12].

Дальнейшей ступенью деструкции лигнина является окислительное расщепление связей β-O-4' с концевыми фенолпропановыми единицами (см. рис. 6). Возможно также расщепление связей

Т а б л и ц а 4

Состав лигнинов здоровой и пораженной грибами «белой гнили» *Coridius versicolor* древесины

Composition of healthy wood lignin and fungus-affected «white rot» *Coridius versicolor*

Образец лигнина	Массовая доля, %			Полуэмпирическая формула
	С	Н	О	
ЛМД здоровой древесины ели	62,8	6,08	31,0	C ₉ H _{8,66} O _{2,75} (OCH ₃) _{0,92}
ЛМД древесины ели с «белой гнилью»	57,9	4,70	37,2	C ₉ H _{7,26} O _{3,92} (OCH ₃) _{0,74}
ЛМД здоровой древесины сосны	63,7	6,29	30,0	C ₉ H _{8,86} O _{2,58} (OCH ₃) _{0,94}
ЛМД древесины сосны с «белой гнилью»	61,4	6,11	32,4	C ₉ H _{8,56} O _{3,20} (OCH ₃) _{0,61}

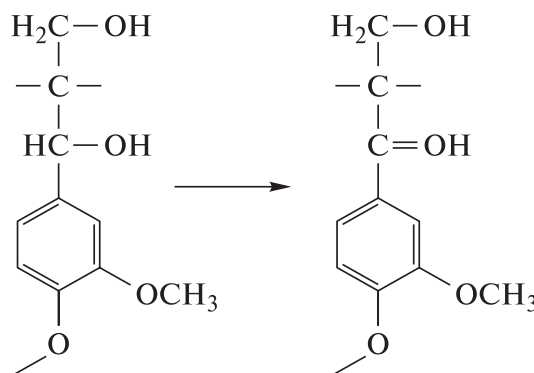


Рис. 5. Схема окисления α-углеродных атомов пропановой цепи в фенолпропановых структурах лигнина под действием ферментов грибов «белой гнили»

Fig. 5. Oxidation scheme of α-carbon atoms of the propane chain in phenylpropane lignin structures under the action of «white rot» mushroom enzymes

α-O-4', β-5', β-1', β-β'. Эти реакции приводят к получению мономерных и димерных соединений, большинство из которых содержат карбоксильные и хинонные группы. Однако и после образования новых продуктов в результате деструкции лигнина продолжается их окисление (рис. 7)

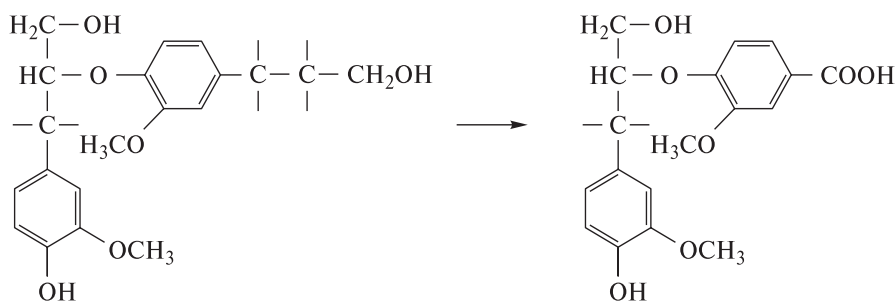


Рис. 6. Схема окисления при разрушении связей между α - и β -углеродными атомами пропановой цепи в фенолпропановых структурах лигнина под действием ферментов грибов «белой гнили»

Fig. 6. The oxidation pattern during the destruction of bonds between α - and β -carbon atoms of the propane chain in the phenylpropane structures of lignin under the influence of fungi «white rot» enzymes

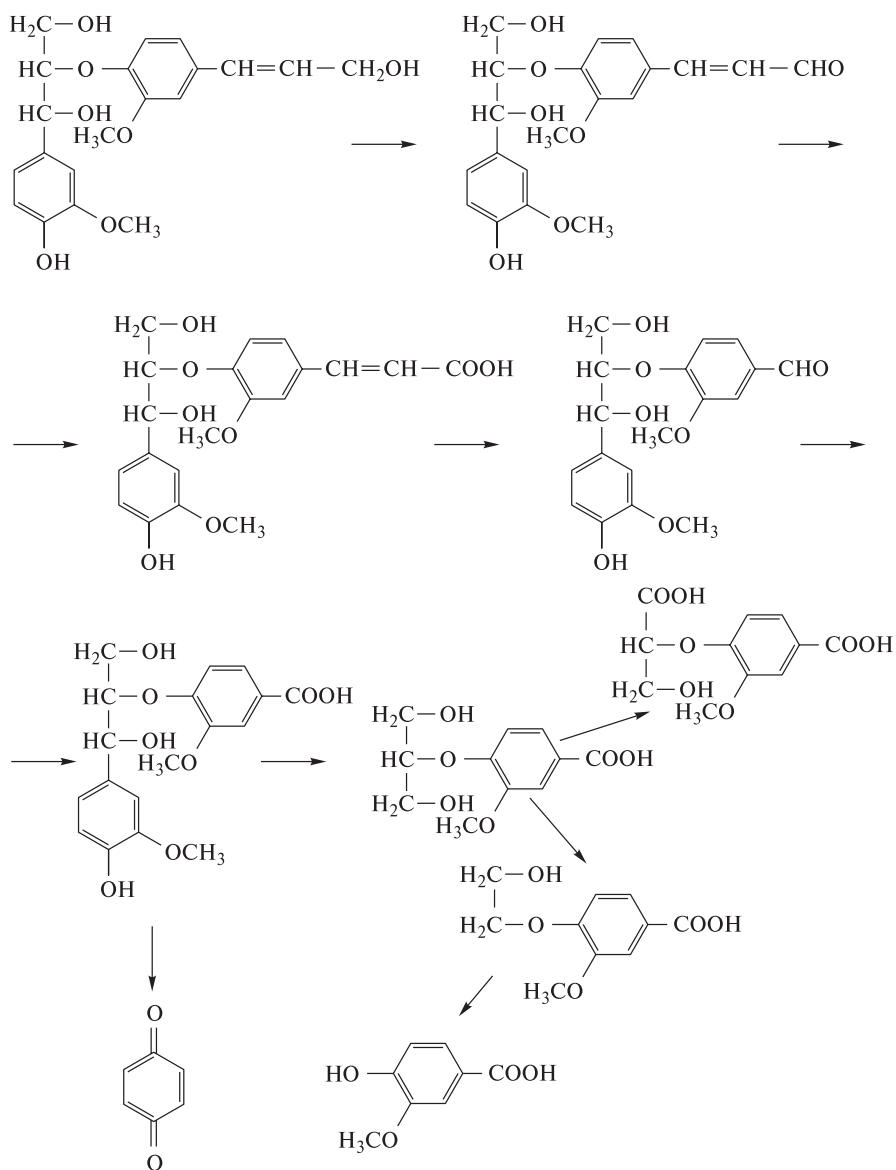


Рис. 7. Окислительная деструкция лигнина под действием ферментов грибов «белой гнили»

Fig. 7. Oxidative degradation of lignin under the action of the «white rot» enzymes

до одноатомных метоксилированных фенолов, фенолокислот, многоосновных непредельных окси- и оксокислот алифатического ряда (рис. 8) [13–18].

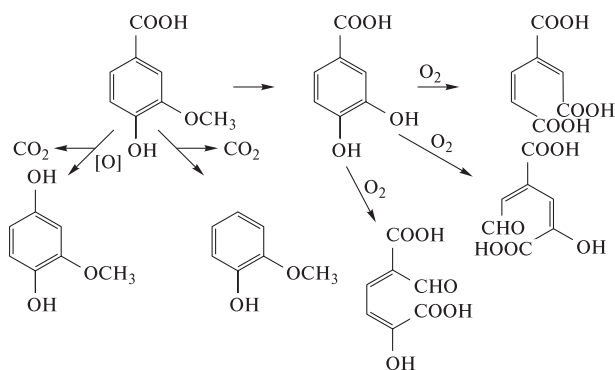


Рис. 8. Окисление мономерных продуктов ферментативного разложения лигнина

Fig. 8. Oxidation of monomeric products of enzymatic lignin decomposition

Фрагментированный лигнин включается в метаболизм грибов, но не полностью, так как некоторая его часть вместе с таннинами превращается в высококонденсированные продукты под действием фермента лакказы, что приводит к образованию цепочек темных гранул, образующих затем крупные агломераты, являющиеся причиной появления «мраморного» рисунка в древесине, пораженной «белой гнилью». При этом конденсированные продукты лигнина, содержащие углерод-углеродные дифенильные структуры, проявляют высокую устойчивость к действию ферментов грибов и создают в древесине барьерные зоны, препятствующие дальнейшему проникновению ферментов. В листовом лигнине сирингильные фрагменты подвергаются деструкции быстрее, чем гваяцильные. Это объясняется большим содержанием в гваяцильной части конденсированных дифенильных структур, которые не склонны к образованию низкомолекулярных продуктов [14, 19, 20].

Целлюлоза в результате действия ферментов грибов «белой гнили», частично превращается в целлобиозу, а гемицеллюлозы — в соответствующие моно- и дисахариды.

Как следует из приведенных схем процессов делигнификации древесины под действием ферментов грибов «белой гнили» она интенсивно обогащается целлюлозой, возможно несколько деструктурированной, и низкомолекулярными продуктами деструкции лигнина. Эти продукты преимущественно высокогидрофильные и, как следствие, водорастворимые, легкоудаляемые атмосферными осадками из микологически разрушенной древесины. Некоторые из этих продуктов — алифатические многоосновные оксо- и оксокислоты,

имеют тенденцию к образованию водородных, а возможно и ковалентных сложноэфирных и ацетальных связей с гидроксилами целлюлозных цепей, тем самым увеличивая расстояние между ними, разрыхляя структуру целлюлозы и снижая ее степень кристалличности [15, 21, 22].

В результате этих процессов образуется целлюлозный продукт, который можно рассматривать как волокнистый полуфабрикат высокого выхода и химическое сырье с повышенной реакционной способностью.

Выводы

1. Носителями экзоферментных систем деструктурирующих грибов являются их гифы.
2. Действие целлюлолитических ферментов ксилофитов приводит к образованию «бурой гнили», а лигнолитических — к образованию «белой гнили».
3. Биохимическое воздействие ферментов ксилофитов коренным образом изменяет как состав древесины, так и химическую природу ее основных компонентов, что открывает возможности для реализации новых вариантов ее использования.

Список литературы

- [1] Фенгел Д., Вегенер Г. Древесина (химия, ультраструктура, реакции). М.: Мир, 1988. 512 с.
- [2] Болобова А.В., Аскадский А.А., Кондращенко В.И., Рабинович М.Л. Теоретические основы биотехнологии древесных композитов. В 2 кн. Кн. 2. Ферменты, модели, процессы. М.: Наука, 2002. 344 с.
- [3] Соловьев В.А., Малышева О.Н., Малева В.И., Саплин И.Л. Изменение химического состава древесины под действием лигнинаразрушающих грибов // Химия древесины, 1985. № 6. С. 94–100.
- [4] Шиврина А.Н., Низковская О.П., Фалина Н.Н. Биосинтетическая деятельность высших грибов. М.: Наука, 1969. 243 с.
- [5] Кононов Г.Н. Дендрохимия. Химия, нанохимия и биогеохимия компонентов клеток, тканей и органов древесных растений. В 2 т. М.: МГУЛ, 2015. Том II. 632 с.
- [6] Степанова Н.Т., Мухин В.А. Основы экологии деструктурирующих грибов. М.: Наука, 1979. 100 с.
- [7] Синицын А.П., Гусаков А.В., Черноглазов В.М. Биоconversion лигноцеллюлозных материалов. М.: Изд-во МГУ, 1995. 224 с.
- [8] Рабинович М.Л., Болобова А.В., Кондращенко В.И. Теоретические основы биотехнологии древесных композитов. В 2 кн. Кн. 1. Древесина и разрушающие ее грибы. М.: Наука, 2001. 264 с.
- [9] Стороженко В.Г., Бондарцева М.А., Соловьев В.А., Крутов В.И. Научные основы устойчивости лесов к деструктурирующим грибам. М.: Наука, 1992. 222 с.
- [10] Озолина Н.Р., Сергеева В.Н., Абрамович Ц.Л. Анатомические и химические изменения древесины березы пораженной грибами белой гнили. // Известия АН Латв. ССР, 1987. № 12. С. 45–52.
- [11] Фостер Д. Химическая деятельность грибов. М.: Иностранная литература, 1950. 651 с.
- [12] Медведева С.А. Превращение ароматической компоненты древесины в процессе биоделигнификации: автореф. дис. ... д-ра хим. наук. Иркутск, 1995. 40 с.

- [13] Беккер З.Э. Физиология и биохимия грибов. М.: Изд-во МГУ, 1988. 230 с.
- [14] Ганбаров Х.Г. Эколого-физиологические особенности дрероразрушающих высших базидальных грибов. Баку: ЭЛМ, 1990. 197 с.
- [15] Рипачек В. Биология дрероразрушающих грибов. М.: Лесная пром-сть, 1967. 258 с.
- [16] Семенкова И.Г., Соколова Э.С. Фитопатология. М.: Академия, 2003. 480 с.
- [17] Ахмедова З.Р. Лигнолитические, ксиланолитические и целлюлолитические ферменты некоторых базидальных грибов и их взаимосвязь в разложении лигноцеллюлозы: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Ташкент, 1999.
- [18] Билай В.И. Трансформация целлюлозы грибами. Киев: Наукова думка, 1982. 295 с.
- [19] Березина М.П., Ерменко М.В., Мартынова Е.Я., Васильева В.К., Маттисон Н.Л., Шиврина А.Н. О механизме физиологического действия осажденного пигментного комплекса чаги на организм // Комплексное изучение физиологически активных веществ низших растений. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1961. 279 с.
- [20] Екабсоне М.Я., Крейцберг З.Н., Сергеева В.Н., Киришаум И.З. Исследование энзиматически разрушенной дресины // Химия дресины, 1978. № 2. С. 61–64
- [21] Горячев Н.Л. Микологически разрушенная дресина как сырье для композиционных пластиков и декоративных изделий: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2015.
- [22] Билай В.И. Основы общей микологии. Киев: Вища шк., 1980. 360 с.

Сведения об авторах

Кононов Георгий Николаевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Химия и химические технологии в лесном комплексе» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), чл.-кор. РАЕН, уч. секретарь секции «Химия и химические технологии дресины» РХО им. Д.И. Менделеева, kononov@mgul.ac.ru

Веревкин Алексей Николаевич — канд. хим. наук, доцент кафедры «Химия и химические технологии в лесном комплексе» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), verevkin@mgul.ac.ru

Сердюкова Юлия Владимировна — ст. преподаватель кафедры «Химия и химические технологии в лесном комплексе» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), caf-htdip@mgul.ac.ru

Зайцев Владислав Дмитриевич — аспирант МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), kelertak@bk.ru

Поступила в редакцию 28.09.2020.

Принята к публикации 21.10.2020.

WOOD MYCOLYSIS, IT'S PRODUCTS AND THEIR USE

III. PHYSIOLOGY AND BIOCHEMISTRY OF WOOD MYCOLYSIS

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

This article is the third in the series «Mycolysis of wood, its products and their use», the first and second are published in the journal «Forestry Bulletin» Volume 24, 2020, No. 2 and No. 4. The article is devoted to the physiology of wood mycolysis under the influence of exoenzymatic systems of wood-destroying fungi. The processes of formation of «brown», «white» and «mottled rot» against the background of biochemical processes of destruction of the components of the ligno-carbohydrate complex of wood matter are considered. The changes in the microstructure and chemical composition of wood during mycolysis and their influence on the physicochemical properties of mycologically destroyed wood are analyzed.

Keywords: cellulite enzymes, lignolytic enzymes, enzymatic hydrolysis, biodelignification

Suggested citation: Kononov G.N., Verevkin A.N., Serdyukova Yu.V., Zaitsev V.D. *Mikoliz drsesiny, ego produkty i ikh ispol'zovanie. III. Fiziologiya i biokhimiya mikoliza drsesiny* [Wood mycolysis, it's products and their use. III. Physiology and biochemistry of wood mycolysis]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 1, pp. 81–88. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-81-88

References

- [1] Fengel D., Vegener G. *Dresina (himiya, ul'trastruktura, reakcii)* [Wood (chemistry, ultrastructure, reactions)]. Moscow: Mir [World], 1988, 512 p.
- [2] Bolobova A.V., Askadskiy A.A., Kondrashchenko V.I., Rabinovich M.L. *Teoreticheskie osnovy biotekhnologii drsesnykh kompozitov. Kn. 2. Fermenty, modeli, protsessy* [Theoretical foundations of biotechnology of wood composites. Book 2. Enzymes, models, processes]. Moscow: Nauka [Science], 2002, 344 p.
- [3] Solov'ev V.A., Malysheva O.N., Maleva V.I., Saplin I.L. *Izmenenie khimicheskogo sostava drsesiny pod deystviem ligninrazrushayushchikh gribov* [Change in the chemical composition of wood under the action of lignin-destructive mushrooms]. *Khimiya drsesiny* [Chemistry of wood], 1985, no. 6, pp. 94–100.

- [4] Shivrina A.N., Nizkovskaya O.P., Falina N.N. *Biosinteticheskaya deyatel'nost' vysshikh gribov* [Biosynthetic activities of higher fungi]. Moscow: Nauka [Science], 1969, 243 p.
- [5] Kononov G.N. *Dendrokhiimiya. Khimiya, nanokhiimiya i biogeokhiimiya komponentov kletok, tkaney i organov drevesnykh rasteniy. V 2 t.* [Chemistry, nanochemistry and biogeochemistry of components of cells, tissues and organs of woody plants. In 2 v.]. Moscow: MSFU, 2015, v. II, 632 p.
- [6] Stepanova N.T., Mukhin V.A. *Osnovy ekologii derevorazrushayushchikh gribov* [Fundamentals of ecology of wood-destroying mushrooms]. Moscow: Nauka [Science], 1979, 100 p.
- [7] Sinitsyn A.P., Gusakov A.V., Chernoglazov V.M. *Biokonversiya lignotsellyuloznykh materialov* [Bioconversion of lignocellulosic materials]. Moscow: MSU, 1995, 222 p.
- [8] Rabinovich M.L., Bolobova A.V., Kondrashchenko V.I. *Toreticheskie osnovy biotekhnologii drevesnykh kompozitov. Kn. 1. Drevesina i razrushayushchie ee griby* [Theoretical foundations of biotechnology of wood composites. Book 1. Wood and mushrooms destroying it]. Moscow: Nauka [Science], 2001, 264 p.
- [9] Storozhenko V.G., Bondartseva M.A., Solov'ev V.A., Krutov V.I. *Nauchnye osnovy ustoychivosti lesovk derevorazrushayushchim gribam* [Scientific principles of forest resistance to wood-destroying mushrooms]. Moscow: Nauka [Science], 1992, 222 p.
- [10] 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]. *Izvestiya AN Latv. SSSR* [Proceedings of the Academy of Sciences of the Latvian USSR], 1987, no. 12, pp. 45–52.
- [11] Foster D. *Khimicheskaya deyatel'nost' gribov* [Chemical activity of fungi]. Moscow: Inostrannaya literatura [Publishing Foreign literature], 1950, 651 p.
- [12] Medvedeva S.A. *Prevrashchenie aromatischeskoy komponenty drevesiny v protsesse biodelignifikatsii* [The transformation of the aromatic components of wood in the process of biodeignification]. Dis. ... Dr. Sci. (Chem.). Irkutsk, 1995.
- [13] Bekker Z.E. *Fiziologiya i biokhiimiya gribov* [Physiology and biochemistry of mushrooms]. Moscow: MSU, 1988, 230 p.
- [14] Ganbarov Kh.G. *Ekologo-fiziologicheskie osobennosti derevorazrushayushchikh vysshikh bazidal'nykh gribov* [Ecological and physiological features of wood-destroying higher basal fungi]. Baku: ELM, 1990, 197 p.
- [15] Ripachek V. *Biologiya derevorazrushayushchikh gribov* [Biology of wood-destroying mushrooms]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest industry], 1967, 258 p.
- [16] Semenkov I.G., Sokolova E.S. *Fitopatologiya* [Plant pathology]. Moscow: Academy, 2003, 480 p.
- [17] Akhmedova Z.R. *Lignoliticheskie, ksilanoliticheskie i tsellyuloliticheskie fermenty nekotorykh bazidal'nykh gribov i ikh vzaimosvyaz' v razlozhenii lignotsellyulozy* [Lignolytic, xylanolytic and cellulolytic enzymes of some basidiomycetes and their relationship in the decomposition of lignocellulose]. Dis. ... Dr. Sci. (Biol.). Tashkent, 1999.
- [18] Bilay V.I. *Trasformatsiya tsellyulozy gribami* [Transformation of cellulose by mushrooms]. Kiev: Naukova Dumka, 1982, 295 p.
- [19] Berezina M.P., M.V. Ermenko, E.Ya. Martynova, V.K. Vasil'eva, Mattison N.L., Shivrina A.N. *O mekhanizme fiziologicheskogo deystviya osazhdennogo pigmentnogo kompleksa chagi na organizm* [On the mechanism of the physiological action of the deposited Chaga pigment complex on the body]. *Kompleksnoe izuchenie fiziologicheskii aktivnykh veshchestv nizshikh rasteniy* [Set studied fiziol. active substances of lower plants]. Moscow–Leningrad, 1961, 279 p.
- [20] Ekabsone M.Ya., Kreytsberg Z.N., Sergeeva V.N., Kirshbaum I.Z. *Issledovanie enzimatischeski razrushennoy drevesiny* [The study of enzymatically destroyed wood]. *Khimiya drevesiny* [Chemistry of wood], 1978, no. 2, pp. 61–64.
- [21] Goryachev N.L. *Mikologicheski razrushennaya drevesina kak syr'e dlya kompozitsionnykh plastikov i dekorativnykh izdeliy* [Mycologically destroyed wood as a raw material for composite plastics and decorative products]. Dis. Cand. Sci. (Tech.). Moscow, 2015.
- [22] Bilay V.I. *Osnovy obshchey mikologii* [Fundamentals of General Mycology]. Kiev: Vishcha shkola [High School], 1980, 360 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 the BMSTU (Mytishchi branch), caf-htdip@mgul.ac

Zaytsev Vladislav Dmitrievich — Pg. of the BMSTU (Mytishchi branch), kelertak@bk.ru

Received 28.09.2020.

Accepted for publication 21.10.2020.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНОРНЫХ КОМПОНЕНТОВ БИОТОПЛИВА, ИЗГОТОВЛЕННОГО НА ОСНОВЕ ТАЛЛОВОГО МАСЛА, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭКОЛОГИЧЕСКУЮ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ СГОРАНИИ

А.Н. Иванкин¹, А.Н. Зарубина¹, А.С. Кулезнев¹,
А.Н. Зенкин¹, А.В. Куликовский²

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

²ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН», 109316, г. Москва, ул. Талалихина, д. 26

aivankin@mgul.ac.ru

Представлены результаты определения компонентов биотоплива, получаемого на основе таллового масла путем переэтерификации в присутствии метанола. Показано, что основными компонентами исходного сырья и полученного на его основе продукта являются природные жирные кислоты и их производные, суммарная массовая доля которых может составлять более 80 %. Установлено, что в составе использованного сырья и продукта его переработки — смеси метиловых эфиров жирных кислот, содержатся примеси органических соединений природного происхождения в количестве от 0,001 до 3 %. Показано, что определение липидных компонентов с точностью ± 20 % целесообразно осуществлять методом газовой хроматографии с пламенно-ионизационным детектированием, который устанавливает наличие в смеси индивидуальных эфиров жирных кислот на уровне от 0,1 до 40 %. Анализ состава минорных компонентов с низким содержанием от 0,001 до 0,1 % может быть осуществлен хроматографическим методом с масс-селективным детектором. В биотопливном продукте обнаружены замещенные производные аминов, гетероспиртов, алкенов, оксиранов, ацеталей. Определено суммарное содержание таких соединений с хроматографической подвижностью до 10 мин, 10...20 мин и более 20 мин, не превышающее 1,5–2 %. Минимальная концентрация некоторых соединений была менее 0,001 % суммы компонентов. Проанализированы образцы биодизеля, полученные из дистиллированного таллового масла, в которых методом масс-спектрометрии установлено отсутствие таких вредных примесей, как бром, йод, фосфор и серозамещенные органические соединения. Подобраны условия определения полного пула минорных соединений. Рассмотрено влияние состава аналитов на результат анализа. Сделан вывод о потенциальной экологической безопасности жидкого биотоплива на основе таллового масла, благодаря компонентному составу, который обеспечивает в целом безопасное сгорание топлива в двигателях технических устройств. **Ключевые слова:** биотопливо, жирные кислоты, газовая хроматография, пламенно-ионизационный детектор, масс-спектрометрический детектор

Ссылка для цитирования: Иванкин А.Н., Зарубина А.Н., Кулезнев А.С., Зенкин А.Н., Куликовский А.В. Определение минорных компонентов биотоплива, изготовленного на основе таллового масла, влияющих на экологическую безопасность при сгорании // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 1. С. 89–99. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-89-99

Талловое масло (ТМ) является побочным продуктом сульфатно-целлюлозного производства и представляет собой жидкость с поликомпонентным комплексом биологически активных веществ растительного происхождения [1, 2]. Талловое масло получают из древесного сырья хвойного и лиственного происхождения. В связи с увеличением в перерабатываемом древесном сырье доли лиственных пород (осины, березы и др.) в составе образцов ТМ различного происхождения содержание жирных кислот и нейтральных веществ, наблюдаемое в ходе аналитических исследований, может изменяться в широком интервале [3].

Так, в составе очищенного ТМ лиственного потока Архангельского целлюлозно-бумажного комбината (ЦБК) суммарно обнаруживается более 75 % природных жирных кислот (ЖК), в том числе (%): олеиновой — 9,7; линолевой — 48,5; линоленовой — 1,3; эйкозеновой — 0,7; стеариновой — 3,6; пальмитиновой — 7; арахидиновой — 2,4; генэйкозановой — 0,8; бегено-

вой — 2,5; лигноцериновой — 1,2. Содержание смоляных кислот (%): пимаровой — 0,6; дегидроабетиновой — 3,7; оксикислот (9-гидроксисиноновой) — 3,8 [4].

Состав сырого ТМ может включать в себя, в зависимости от вида сырья и технологии его переработки, до 30...50 % смоляных кислот, 35...90 % ЖК и несколько процентов сернистых соединений, которые после дистилляционной очистки ТМ остаются в кубовом остатке [5].

Очищенные талловые масла обычно содержат 92...94 % ЖК, в основном C_{11-18} , 2...3 % смоляных кислот и 2...5 % неомыляемых веществ. Из сырого ТМ древесины лиственных пород вакуумной дистилляцией с присадкой водяного пара выделяют до 70 % ЖК, содержащихся в виде продукта высокой степени чистоты. Доля ЖК в них превышает 96...97 %, доля неомыляемых веществ составляет около 1 % [6].

Основными липидными компонентами ТМ являются природные триглицериды, в которых

алкильные заместители представляют собой остатки предельных, моно- и полиненасыщенных жирных кислот [7, 8].

Объемы производства ТМ в промышленности значительны. Наличие такого доступного источника ЖК можно использовать для получения алкиловых эфиров ЖК, которые сегодня можно применять в качестве различных типов моторного топлива, в частности, биодизеля [9–11].

В связи с ужесточением требований к качеству моторного топлива возникает необходимость в количественном определении его составляющих. Наиболее точный результат можно получить методом газовой хроматографии с пламенно-ионизационным и масс-спектрометрическим детектированием [12, 13].

Жирные кислоты в составе липидов природного происхождения хорошо определяются методом газовой хроматографии. Для этого липиды подвергают предварительному алкилированию в присутствии, как правило, метанола, что позволяет перевести их в легколетучую форму метиловых эфиров с последующим детектированием, например, с использованием пламенно-ионизационного детектора (ПИД), либо методом высоко-эффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ). Жирно-кислотный состав определяемых объектов в зависимости от методики определения обычно включает в себя 20...25 основных компонентов, 70 % из которых приходится на две предельные — пальмитиновую, стеариновую и одну непредельную олеиновую ЖК [14–16].

Наличие минорных примесей, загрязняющих выхлопные газы, которые могут влиять на качество биодизеля или смесового моторного топлива, произведенного на его основе, можно устанавливать с помощью хроматомасс-спектрометрии [17].

Исследования в данной области сосредоточены сегодня на выявлении конкретных форм ЖК в объектах, получаемых из сырья различного происхождения, а также на необходимости определения примесей низкого содержания, которые могут влиять на физико-химические показатели топлива и на состав выхлопных газов двигателей, их экологическую безопасность.

Определение соединений с низким содержанием примесей в маслах растительного происхождения представляет собой проблему в связи с близостью химической структуры некоторых компонентов и недостаточной селективностью хроматографических колонок [13, 15].

Эффективность разделения ЖК в форме метиловых эфиров на селективных капиллярных колонках методом газовой хроматографии достаточна для идентификации метиловых эфиров ЖК с их содержанием на уровне 0,1...0,5 % (масс.) в определяемой смеси [13, 17, 18].

Определение липидных компонентов, построенное только на хроматографическом анализе объектов, имеет концентрационные ограничения, поэтому возникает необходимость использования высокочувствительных детекторов, позволяющих выявлять примеси на уровне тысячных долей процента относительно суммы ЖК [8, 10, 13].

Цель работы

Цель работы — определение макро- и микросоставляющих компонентов смеси ЖК близкого химического состава в липидах ТМ, а также оптимизация условий их хроматомасс-спектрометрического определения.

Методика исследования

В качестве объекта анализа использовали ЖК талловых масел, произведенные на Сегежском ЦБК по ГОСТ 14845–79, дистиллированное ТМ, полученное там же по ТУ 13-00281074-26–95 с различными сроками хранения.

Содержание основных составляющих компонентов ЖК анализировали с использованием газового хроматографа 7890А с капиллярной колонкой HP-Innowax Ø 0,2 мм, l — 30 м, толщиной слоя фазы 0,33 мкм с ПИД детектором. Минорные примеси органических соединений анализировали с использованием колонки HP-5MS 0,25 мм × 30 м × 0,25 мкм с масс-селективным детектором (МСД) 5975С VLMSD Agilent Technologies (USA).

Для калибровки хроматографа применяли растворы стандартов метиловых эфиров С4–С24 ЖК в метаноле № 47885U Supelco массовой концентрации 10 мг/мл (Fluca, Швейцария).

Условия хроматографирования описаны ранее [8, 13]. Хроматограмма стандартных веществ приведена на рис. 1. Количество определяемого соединения оценивали сравнением площади его пика с площадью пика внутреннего стандарта.

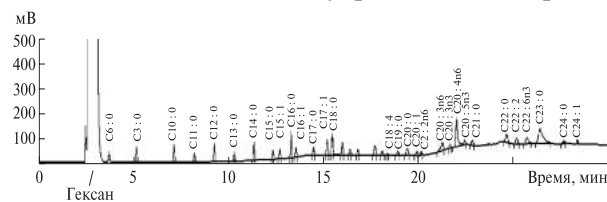


Рис. 1. Хроматографическая подвижность стандартов метиловых эфиров С6–С24 жирных кислот с концентрацией 2...6 ммоль/л в гексане на колонке HP-Innowax 0,2 мм × 30 м × 0,33 мкм

Fig. 1. Chromatogram of methyl ether standards of C6–C24 fatty acid with a concentration of 2–6 mmol/L in hexane on an HP-Innowax 0,2 mm × 30 m × 0,33 μm column

Для расчета содержания компонентов, определенных на ПИД, применяли автоматическую базу поиска и идентификации данных NIST08 MS Library с вероятностью установления пиков более 90 %.

Т а б л и ц а 1

Состав липидной фракции жирных кислот, выделенных экстрагированием хлороформом с метанолом и последующим метилированием таллового масла, % ($n = 5, p = 0,95$)

The composition of the lipid fraction of fatty acids, extracted by extraction of chloroform with methanol and subsequent methylation of tall oil, % ($n = 5, p = 0,95$)

Наименование жирной кислоты	Кислоты жирные талловые	Дистиллированное талловое масло	Талловое масло со сроком хранения 10 лет	Хроматографическая подвижность, мин
Масляная C4:0	–	0,06 ± 0,02	–	3,88
Капроновая C6:0	–	–	0,05 ± 0,02	4,32
Каприловая C8:0	–	0,11 ± 0,03	0,06 ± 0,02	4,70
Каприновая C10:0	–	0,24 ± 0,06	0,15 ± 0,04	6,59
Деценовая C10:1	–	0,12 ± 0,04	0,03 ± 0,01	6,88
Ундециловая C11:0	–	0,08 ± 0,02	0,05 ± 0,01	8,42
Лауриновая C12:0	0,31 ± 0,09	0,27 ± 0,07	0,16 ± 0,05	8,60
Тридекановая C13:0	0,08 ± 0,03	0,09 ± 0,04	0,1 ± 0,04	9,60
Миристиновая C14:0	0,16 ± 0,06	0,22 ± 0,05	0,15 ± 0,04	10,76
Миристолеиновая C14:1	–	0,07 ± 0,02	0,21 ± 0,11	11,25
Пентадекановая C15:0	0,12 ± 0,03	–	0,89 ± 0,18	11,70
<i>цис</i> -10-Пентадеценовая C15:1	–	0,4 ± 0,06	0,2 ± 0,03	12,12
Пальмитиновая C16:0	1,66 ± 0,43	1,9 ± 0,54	1,23 ± 0,39	12,79
Пальмитолеиновая C16:1	0,2 ± 0,05	0,4 ± 0,02	0,17 ± 0,06	13,68
Маргариновая C17:0	0,33 ± 0,06	0,65 ± 0,12	0,14 ± 0,03	14,05
Гептадеценовая C17:1	1,21 ± 0,44	1,17 ± 0,32	0,27 ± 0,13	14,30
Стеариновая C18:0	4,99 ± 1,13	2,4 ± 0,62	20,73 ± 5,65	15,52
Олеиновая C18:1n9c	20,4 ± 1,87	20,9 ± 2,05	27,8 ± 2,84	15,73
Элаидиновая C18:1n9t	0,2 ± 0,05	2,12 ± 0,55	1,39 ± 0,35	15,96
Линолевая C18:2n6	47,8 ± 3,16	32,3 ± 3,06	17,16 ± 2,57	16,37
γ -Линоленовая C18:3n6	8,33 ± 1,77	9,4 ± 2,02	1,71 ± 0,31	17,95
α -Линоленовая C18:3n3	2,16 ± 0,09	1,55 ± 0,11	1,14 ± 0,23	18,25
Нондекановая C19:0	0,05 ± 0,01	–	0,65 ± 0,16	18,40
Гадолеиновая C20:1n9	0,51 ± 0,08	2,11 ± 0,39	1,38 ± 0,23	18,65
Арахидиновая C20:0	3,14 ± 0,76	3,66 ± 0,88	1,78 ± 0,38	18,75
<i>цис</i> -11,14-Эйкозодиеновая C20:2	0,11 ± 0,02	3,24 ± 0,65	1,71 ± 0,31	18,80
<i>цис</i> -8,11,14-Эйкозатриеновая C20:3n6	0,25 ± 0,06	0,87 ± 0,21	2,57 ± 0,45	18,95
<i>цис</i> -11,14,17-Эйкозатриеновая C20:3n3	0,11 ± 0,02	0,12 ± 0,03	1,55 ± 0,33	19,11
Арахидиновая C20:4n6	0,2 ± 0,05	2,47 ± 0,36	0,29 ± 0,07	19,25
Эйкозапентаеновая C20:5n3	0,08 ± 0,02	0,22 ± 0,05	0,17 ± 0,07	19,36
Генэйкозановая C21:0	0,36 ± 0,21	0,61 ± 0,19	0,24 ± 0,01	19,57
Бегеновая 22:0	0,28 ± 0,05	0,93 ± 0,28	1,05 ± 0,33	19,75
Эруковая C22:1n9	0,16 ± 0,03	0,32 ± 0,11	0,33 ± 0,12	20,24
<i>цис</i> -13,16,17-Докозодиеновая C22:2	0,07 ± 0,02	1,1 ± 0,15	1,07 ± 0,18	20,67
<i>цис</i> -5,8,11,14,17-Докозапентаеновая C22:5n3	–	–	0,3 ± 0,07	21,53
<i>цис</i> -4,7,10,13,16,19-Докозагексаеновая C22:6n3	0,11 ± 0,03	0,02 ± 0,01	–	22,05
Трикозановая C23:0	0,34 ± 0,08	–	0,15 ± 0,04	23,2
Лигноцериновая C24:0	0,28 ± 0,05	3,88 ± 0,49	1,32 ± 0,38	22,9
Тетракозановая C24:1	0,15 ± 0,03	–	0,1 ± 0,06	23,73

Примечание. Прочерк соответствует уровню содержания менее 0,01 %.

Анализ состава изомеров ЖК и сопутствующих летучих компонентов проводили с использованием более высокочувствительного, чем ПИД, МСД 5975С VLMSD. Для расчета содержания изомеров также применяли автоматическую базу поиска и идентификации данных хромато-масс-спектрометрии NIST08 MS Library с вероятностью соотношения пиков более 75 %.

Для количественного определения минорных компонентов и примесей использовали библиотечные масс-спектры соединений в автоматическом режиме.

Результаты и обсуждение

Получены результаты газохроматографического определения состава основных сырьевых компонентов ТМ — ЖК с использованием ПИД (табл. 1). Основное содержание компонентов на уровне 60...70 % приходится на остатки олеиновой, пальмитиновой и стеариновой ЖК, что характерно для объектов природного происхождения [13, 15, 18].

Жирные кислоты ТМ в оптимальных условиях разделения (см. табл. 1) можно идентифицировать с точностью определения в среднем $\pm 20\%$ ($n = 5$). Нижняя граница определяемого содержания индивидуальной ЖК с использованием капиллярной колонки длиной 30 м и ПИД составляла в среднем более 0,05 % суммы компонентов анализируемой смеси. Как видно, использование ПИД с 30-метровой капиллярной колонкой в оптимальных условиях достоверно позволяет идентифицировать до 40 пиков основных ЖК, входящих в состав продукта.

Ранее в наших публикациях мы указывали, что одним из основных липидсодержащих компонентов растительного и любого другого природного происхождения, является *цис*-9-октадеценовая (олеиновая) кислота [8]. Структурным аналогом ее выступает *транс*-9-октадеценовая (элаидиновая) кислота, определение которой в смеси с содержанием менее 0,1 % затруднено при использовании ПИД вследствие близости времени удержания соответствующих пиков на хроматограммах для 30-метровых капиллярных колонок [13].

При получении биотоплива из ТМ, особенно из дистиллированного, мы получали образцы продукта, прошедшие длительную температурную обработку, которая обуславливала интенсивный процесс *цис*-*транс*-изомеризации и содержание элаидиновой кислоты за счет частичного превращения олеиновой, становилось значительным. Наличие элаидиновой кислоты в образце биотоплива составляло более 1...2 % суммы ЖК по сравнению с исходным сырьем. Этот уровень содержания достаточно надежно устанавливается с помощью ПИД (рис. 2).

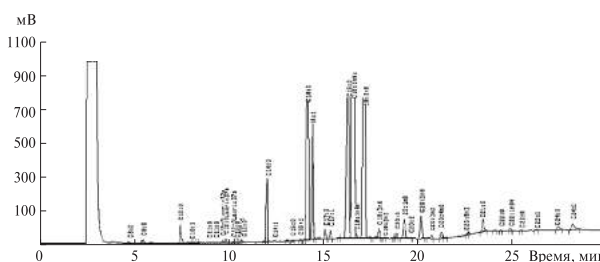


Рис. 2. Хроматограмма содержания основных жирных кислот в биодизеле, полученного трансэтерификацией метанолом дистиллированного таллового масла. Концентрация — 1 мг/мл в гексане

Fig. 2. Chromatogram of the content of basic fatty acids in biodiesel obtained by transesterification of distilled tall oil with methanol. Concentration — 1 mg/ml in hexane

Основной состав (% от суммы) ЖК компонентов жидкого биодизеля, полученного из различных образцов сырья ТМ ($n = 6$):

C12:0	.....	0,3...0,5	C20:0	.....	3,0...3,5
C14:0	.....	0,1...0,3	C20:1n9	....	0,4...0,6
C16:0	.....	1,5...3,5	C20:2	.....	0,05...0,2
C16:1	.....	0,2...0,4	C20:3n6	....	0,2...0,3
C17:0	.....	0,3...0,6	C20:3n3	....	0,1...0,2
C17:1	.....	1,2...2,5	C20:4n6	....	0,2...0,4
C18:0	.....	5,5...7,7	C20:5n3	....	0,05...0,2
C18:1n9c	...	20,0...22,6	C21:0	.....	0,3...0,5
C18:1n9t	...	2,5...5,8	C22:0	.....	0,2...0,5
C18:2n6	...	42,4...48,1	C22:1n9	....	0,1...0,3
C18:3n6	....	8,0...8,5	C22:2	.....	0,1...0,4
C18:3n3	....	2,0...2,5	C23:0	.....	0,1...0,4
C19:0	.....	0,05...0,1	C24:0	.....	0,3...0,5

Повышенное содержание отдельных непредельных ЖК — линолевой C18:2n6 и γ -линоленовой C18:3n6 — по сравнению с исходным сырьем может быть связано с технологическими особенностями трансформации ТМ в биодизель.

Метод хроматографического определения основных компонентов биотоплива, получаемого из природного сырья — ТМ с использованием ПИД позволяет устанавливать содержание основных компонентов — ЖК, массовая доля которых обычно достаточно высокая, больше 90 %. Они представляют собой основную массу топливного продукта и определяют его «экологичность» — возможность полного сгорания алкиловых эфиров в двигателе с образованием диоксида углерода и воды, т. е. выхлопные газы работающего двигателя в этом случае практически не выделяют в окружающую среду вредных газообразных отходов, которые могут образовываться при использовании минеральных видов топлива.

Однако поскольку метилирование ТМ является процессом переработки природного сырья расти-

Т а б л и ц а 2

Содержание основных минорных примесей в биодизеле из таллового масла (%) на колонке HP-5MS 0,25 мм × 30 м × 0,25 мкм с использованием масс-селективного детектора с хроматографической подвижностью менее 10 мин (n = 12, p = 0,95)

The content of the main minor impurities in biodiesel from tall oil (%) on an HP-5MS 0,25 mm × 30 m × 0,25 μm column using a mass selective detector with a chromatographic mobility of less than 10 min (n = 12, p = 0,95)

Вещество	№ в CAS реестре	Время удерживания, мин	Содержание, %		Вероятность соотношения пика, %	Характеристический ион (его относительная интенсивность), усл. ед.
			C _{min}	C _{max}		
Додеканаль	000112-54-9	4,741	0,01	0,34	86	41(999), 43(930), 29(700), 55(530), 57(480), 27(470), 44(370), 82(300), 39(280), 56(280)
1Н-пиррол-1-метанол	092776-61-9	5,809	0,002	0,01	83	67(999), 41(788), 97(787), 39(690), 28(547), 80(535), 40(435), 31(349), 38(225), 29(172)
1-Метоксиметоксидодекан	034458-41-8	6,162	0,005	0,04	94	45(999), 75(236), 43(230), 57(214), 41(192), 55(186), 69(183), 82(179), 83(172), 71(165)
1-Тридецен	002437-56-1	6,478	0,001	0,04	83	43(999), 55(912), 41(829), 57(761), 56(751), 69(734), 70(712), 83(670), 97(471), 84(400)
3-Циклопентилпропилциклогексан	002883-07-0	6,696	0,005	0,05	88	83(999), 41(960), 55(859), 82(803), 67(383), 69(338), 96(333), 68(294), 39(279), 194(204)
Метил-4-гептаноат	054004-29-4	6,815	0,005	0,06	75	41(999), 74(980), 43(630), 68(470), 39(450), 55(450), 69(430), 67(320), 59(300), 82(202)
14-Метил-8-гексадеценаль	060609-53-2	6,997	0,002	0,08	70	55(999), 70(955), 41(751), 57(610), 83(525), 69(510), 67(507), 43(428), 81(425), 95(351)
2-Хлорметил-1-бутен	023010-02-8	7,516	0,005	0,03	80	69(999), 41(919), 55(601), 39(592), 68(564), 53(553), 104(456), 27(417), 67(339), 42(266)
цис-2-Метилциклогексанол	007443-70-1	7,957	0,002	0,24	77	57(999), 81(907), 96(788), 68(735), 71(558), 55(419), 41(327), 67(256), 43(247), 44(234)
Гептадецилоксиран	067860-04-2	8,242	0,002	0,69	72	82(999), 43(951), 55(811), 41(778), 96(733), 71(667), 57(619), 83(556), 68(538), 69(523)
Тетрадекан	000629-59-4	8,382	0,005	0,47	90	57(999), 43(740), 71(643), 85(423), 41(261), 29(163), 55(143), 56(143), 70(117), 42(86)
Тридеканаль	010486-19-8	8,543	0,005	0,78	91	57(999), 43(932), 41(732), 82(700), 55(666), 68(443), 69(389), 29(378), 44(362), 71(349)
Тридецилоксиран	018633-25-5	8,823	0,002	0,32	91	41(999), 43(949), 82(935), 55(841), 71(812), 96(626), 68(608), 69(551), 29(535), 57(516)
1,9-Тетрадекадиен	112929-06-3	9,109	0,001	0,28	25	55(999), 41(703), 67(564), 81(549), 82(415), 54(409), 69(391), 95(353), 68(331), 96(322)
1-Децен	000872-05-9	9,358	0,002	0,40	70	56(999), 55(876), 41(834), 43(814), 70(806), 57(692), 69(572), 29(374), 42(349), 83(336)
7-Пентилбицикло-[4.1.0] гептан	041977-45-1	9,441	0,001	0,05	76	67(999), 82(850), 55(680), 41(600), 81(600), 83(500), 96(450), 95(350), 109(280), 68(230)
1-Тетрадеканол	000112-72-1	9,555	0,001	0,41	80	43(999), 55(943), 69(733), 41(731), 83(695), 57(684), 56(596), 70(526), 97(483), 29(365)
2-Додеканон	006175-49-1	9,623	0,001	0,51	91	58(999), 43(752), 59(308), 71(289), 41(169), 57(130), 29(101), 55(96), 85(69), 27(53)
Тетрадеканаль	000124-25-4	9,835	0,002	0,85	98	57(999), 82(862), 43(806), 55(710), 41(673), 68(551), 96(515), 69(509), 83(472), 71(439)
2-Тридеканон	000593-08-8	9,955	0,001	0,25	91	58(999), 43(701), 59(401), 71(385), 41(227), 55(166), 57(163), 85(119), 29(71), 96(68)

тельного происхождения, в конечном продукте в очень малых количествах были обнаружены примеси других органических соединений, которые нельзя достоверно определить методом хроматографии с ПИД вследствие недостаточной чувствительности.

Для установления наличия таких минорных примесей использовали метод хроматомасс-спек-

трометрии, обладающий чувствительностью на 2–3 порядка ниже, чем при использовании ПИД.

Получены результаты МСД определения минорных примесей в жидком биодизеле, произведенном из дистиллированного ТМ путем этерификации в присутствии метанола (табл. 2–5). В таблицах указаны наиболее значимые характеристические пики масс-спектра характерных

Т а б л и ц а 3

Содержание основных минорных примесей в биодизеле из таллового масла (%) на колонке HP-5MS 0,25 мм × 30 м × 0,25 мкм с использованием масс-селективного детектора с хроматографической подвижностью от 10 до 15 мин ($n = 12, p = 0,95$)
The content of the main minor impurities in biodiesel from tall oil (%) on an HP-5MS 0,25 mm × 30 m × 0,25 μm column using a mass-selective detector with a chromatographic mobility of 10 to 15 min ($n = 12, p = 0,95$)

Вещество	№ в CAS реестре	Время удерживания, мин	Содержание, %		Вероятность соотношения пика, %	Характеристический ион (относительная интенсивность), усл. ед.
			C_{\min}	C_{\max}		
<i>транс</i> -2-Додецен-1-ол	069064-37-5	10,121	0,001	1,58	95	57(999), 41(490), 43(456), 55(439), 82(383), 67(299), 68(273), 81(264), 69(245), 95(216)
7-Бутилбицикло[4.1.0]гептан	018645-10-8	10,214	0,001	0,39	74	82(999), 57(730), 41(640), 43(640), 55(630), 67(580), 81(510), 96(490), 68(370), 69(360)
Гексадецилоксиран	007390-81-0	10,375	0,002	1,14	91	82(999), 55(988), 71(972), 43(845), 41(800), 57(760), 83(705), 69(674), 96(669), 81(668)
5-Октен-1-ол	064275-73-6	10,458	0,002	1,06	80	67(999), 41(861), 68(650), 81(626), 82(580), 55(516), 43(292), 57(280), 69(250), 95(229)
1-Нонадецен	018435-45-5	10,852	0,001	1,05	83	57(999), 83(985), 97(946), 55(941), 43(928), 69(837), 41(797), 56(632), 71(602), 70(590)
1,12-Тридекадиен	021964-48-7	10,930	0,002	0,65	75	55(999), 41(951), 81(544), 67(517), 82(497), 54(451), 69(416), 68(381), 39(334), 29(324)
Гексадеканаль	000629-80-1	11,226	0,005	3,18	96	43(999), 41(879), 57(844), 29(712), 55(627), 82(525), 68(391), 44(390), 69(354), 67(329)
1-Октадецен	000112-88-9	11,807	0,001	0,82	87	43(999), 55(939), 41(935), 57(880), 83(716), 69(646), 97(619), 56(550), 70(498), 71(409)
2-Пентадеканон	002345-28-0	11,999	0,001	2,75	90	58(999), 59(630), 43(623), 71(398), 57(205), 41(182), 85(141), 55(140), 96(114), 82(97)
Пентадеканаль	002765-11-9	12,144	0,001	11,59	94	82(999), 57(860), 41(760), 55(720), 43(690), 96(640), 81(570), 83(510), 69(450), 95(450)
9-Нонадецен	106073-69-2	12,497	0,001	0,47	85	81(999), 41(956), 67(928), 95(780), 55(672), 43(628), 82(601), 29(550), 54(444), 69(438)
1-Докозен	001599-67-3	12,627	0,001	1,74	89	57(999), 43(950), 97(864), 55(847), 83(809), 41(638), 69(623), 71(509), 111(462), 56(431)
1,19-Эйкозадиен	014811-95-1	12,917	0,001	2,42	96	55(999), 82(752), 96(585), 69(583), 41(559), 83(547), 81(508), 43(429), 97(391), 67(387)
Стигмастерол	000083-48-7	13,255	0,002	3,80	90	55(999), 83(692), 81(638), 69(636), 133(444), 43(431), 91(427), 105(427), 159(418), 95(398)
15-Метилгексаноат	006929-04-0	14,612	0,001	0,33	95	143 (95), 87 (618), 75 (229), 74 (999), 69 (137), 57 (175), 55 (238), 43 (444), 41 (271), 29 (113)

Т а б л и ц а 4

Содержание основных минорных примесей в биодизеле из таллового масла (%) на колонке HP-5MS 0,25 мм × 30 м × 0,25 мкм с использованием масс-селективного детектора с хроматографической подвижностью от 15 до 20 мин (n = 10, p = 0,95)
The content of the main minor impurities in biodiesel from tall oil (%) on an HP-5MS 0,25 mm × 30 m × 0,25 μm column using a mass-selective detector with a chromatographic mobility of 15 to 20 min (n = 10, p = 0,95)

Вещество	№ в CAS реестре	Время удерживания, мин	Содержание, %		Вероятность соотношения пика, %	Характеристический ион (относительная интенсивность), усл. ед.
			C _{min}	C _{max}		
2-Гексадеканол	014852-31-4	15,268	0,001	0,40	83	45(999), 43(487), 41(446), 55(390), 57(361), 69(268), 97(235), 83(233), 29(192), 71(183)
Метил-7,10-октадеканоат	056554-24-6	15,415	0,001	0,26	95	67(999), 81(900), 41(720), 55(700), 95(670), 43(630), 82(540), 79(480), 96(450), 68(430)
Тетрагидро-2-(12-пентадецилокси)-2Н-пиран	056666-38-7	15,538	0,002	0,72	80	85(999), 55(410), 56(267), 41(260), 84(212), 57(184), 67(184), 101(184), 43(164), 28(143)
Метил-8,11-октадеканоат	056599-58-7	15,54	0,001	0,16	90	67(999), 81(785), 41(650), 55(631), 95(595), 68(460), 82(447), 69(417), 54(411), 79(392)
Метил-5,8,11,14-эйкозатриеноат	002566-89-4	16,115	0,002	0,08	95	79(999), 91(848), 80(673), 67(630), 93(605), 105(465), 106(436), 41(370), 81(368), 77(366)
Метил-7,10,13-эйкозатриеноат	030223-51-9	16,167	0,002	0,64	89	67(999), 80(918), 79(912), 41(701), 55(666), 81(643), 93(605), 94(438), 91(432), 95(418)
Метил-8,11,14-эйкозатриеноат	001783-84-2	16,195	0,002	0,54	89	79(999), 67(893), 80(863), 81(610), 55(584), 93(580), 41(527), 91(406), 95(395), 94(387)
Метил-11-эйкозеноат	003946-08-5	16,334	0,002	0,22	86	55(999), 69(730), 41(720), 43(630), 74(570), 83(560), 292(520), 97(460), 57(390), 84(390)
6-Гептилтетрагидро-2Н-пиран-2-он	000713-95-1	16,342	0,001	0,54	64	99(999), 71(308), 41(269), 43(256), 55(229), 70(229), 42(184), 27(133), 29(128), 69(121)
4-Этил-5-метилнонан	001632-71-9	16,425	0,002	0,53	43	43(999), 41(530), 84(398), 57(386), 29(290), 55(275), 85(252), 27(220), 56(212), 42(153)
Метил-11-октадеканоат	052380-33-3	16,45	0,001	0,13	95	55(999), 41(860), 43(590), 69(530), 74(400), 29(330), 67(280), 87(240), 54(220), 59(220)
Метил-12-октадеканоат	056554-46-2	16,48	0,001	0,09	90	55(999), 41(770), 69(720), 74(540), 43(430), 83(430), 87(370), 97(350), 84(320), 264(310)
14-Трикозенилформиат	077899-10-6	17,250	0,001	0,27	64	55(999), 82(937), 96(809), 69(764), 83(725), 43(627), 57(524), 97(522), 81(516), 68(478)
Метил-13-докозеноат	001120-34-9	17,40	0,002	0,35	92	55(999), 41(808), 43(620), 69(600), 74(478), 83(439), 57(375), 320(373), 29(342), 97(313)
7-Гексадецениоат	056875-67-3	17,47	0,001	0,18	80	55(999), 41(898), 43(709), 74(671), 69(516), 67(505), 83(417), 87(413), 96(402), 84(390)
12-Трикозанон	000540-09-0	18,147	0,002	0,05	72	183(999), 43(642), 57(592), 58(391), 71(366), 41(357), 198(326), 55(306), 199(306), 85(196)
9-Трикозен	027519-02-4	18,760	0,001	0,08	78	55(999), 97(993), 83(968), 57(947), 69(790), 43(764), 41(559), 111(546), 56(472), 71(459)
2-Метилгексадекан	001560-92-5	19,714	0,001	0,03	76	57(999), 43(926), 71(582), 85(403), 41(349), 55(204), 29(188), 56(188), 197(169), 99(155)

Т а б л и ц а 5

Содержание основных минорных примесей в биодизеле из таллового масла (%) на колонке HP-5MS 0,25 мм × 30 м × 0,25 мкм с использованием масс-селективного детектора с хроматографической подвижностью более 20 мин ($n = 12, p = 0,95$)

The content of the main minor impurities in biodiesel from tall oil (%) on an HP-5MS 0,25 mm × 30 m × 0,25 μm column using a mass-selective detector with a chromatographic mobility of more than 20 min ($n = 12, p = 0,95$)

Вещество	№ в CAS реестре	Время удерживания, мин	Содержание, %		Вероятность соотношения пика, %	Характеристический ион (относительная интенсивность), усл. ед.
			C_{\min}	C_{\max}		
4-Этил-2-октен	053966-52-2	20,160	0,001	0,08	80	55(999), 69(502), 41(436), 83(349), 29(247), 27(226), 70(198), 39(153), 98(147), 56(121)
Эйкозан	000112-95-8	20,314	0,002	0,03	71	57(999), 71(772), 43(630), 85(605), 41(313), 55(268), 99(202), 56(153), 69(150), 113(138)
2-(4-Метилфенил)индолизин	004536-26-9	20,545	0,001	0,05	84	207(999), 206(302), 204(109), 102(80), 103(69), 205(50), 90(36), 128(36), 165(27), 127(25)
4-Циклогексилундекан	013151-79-6	21,385	0,001	0,01	75	83(999), 57(932), 55(876), 82(661), 43(616), 41(553), 71(425), 97(407), 69(404), 67(338)
1-Гексакозен	018835-33-1	21,733	0,001	0,04	83	43(999), 57(819), 55(794), 41(654), 97(581), 69(482), 83(471), 71(383), 29(364), 56(339)
Нонадекан	000629-92-5	21,966	0,002	0,02	73	57(999), 43(819), 71(659), 85(429), 41(367), 29(231), 268(218), 55(216), 99(160), 56(139)
Холеста-3,5-диен	000747-90-0	22,848	0,001	0,05	77	368(999), 81(860), 43(789), 147(769), 107(629), 55(625), 145(621), 105(615), 41(533), 95(529)
2-Гидроксиметилгексадеканоат	016742-51-1	23,170	0,001	0,03	74	43(999), 57(875), 55(828), 69(828), 83(772), 41(761), 97(670), 90(517), 29(415), 71(390)
N-бензил-N-этил-п-изопропилбензамид	015089-22-2	24,727	0,002	0,04	78	147(999), 281(452), 91(219), 280(124), 148(123), 282(108), 134(87), 77(73), 104(72), 252(59)

ионов, по которым происходила МСД-идентификация в системе NIST 08, минимальный уровень идентификации соединений и установленный уровень их содержания в анализе.

Из данных табл. 2–5 видно, что кроме основных компонентов — ЖК в продукте обнаружено несколько десятков примесей органических соединений природного происхождения. Продукт получен из растительного сырья и содержит остатки биохимических веществ древесного происхождения. Суммарное количество таких соединений с хроматографической подвижностью до 10 мин, 10...20 мин и более 20 мин в анализе не превышало 1,5...2 %. Минимальная концентрация соединений составляла менее 0,01 %. Проанализированные образцы биодизеля, полученные из дистиллированного ТМ, не содержали, по данным масс-спектрометрического анализа, таких вредных примесей, как бром, иод, фосфор и серозамещенные органические соединения. Содержание хлор-

замещенных органических веществ во всех образцах ($n = 25$) в сумме не превышало 0,08 %, а N-замещенных производных было менее 0,05 %. Это указывает на высокую экологическую чистоту возможных выхлопных газов продуктов сгорания рассматриваемого биотоплива, поскольку наличие азот-содержащих веществ в выхлопных газах работающих двигателей представляет высокую степень опасности для человека.

Выводы

Определение основных компонентов — ЖК в биотопливе, получаемом из продуктов переработки растительного сырья — ТМ, а также установление количества примесей веществ с очень низким уровнем содержания показывает, что данное биотопливо, предназначенное для двигателей транспортных устройств может рассматриваться как экологически безопасное.

Разработанная методика с использованием метода газовой хроматографии с масс-спектрометри-

ческим детектированием позволяет количественно определять практически все составляющие компоненты жидкого биотоплива, получаемого на основе продукта химической переэтерификации ТМ на уровне содержания с массовой долей от 0,001 до 48,5 %. Выявлено более 250 химических компонентов в биотопливе, которые могут обеспечить при использовании в топливных системах его экологическую безопасность.

Список литературы

- [1] Aro T., Fatehi P. Tall oil production from black liquor: Challenges and opportunities // *Separation and Purification Technology*, 2017, v. 17524, no 3, pp. 469–480.
- [2] Uusi-Kuyny P., Pakkanen M., Linnekoski J., Alopaeus V. Hydrogen solubility measurements of analyzed tall oil fractions and a solubility model // *The J. of Chemical Thermodynamics*, 2017, v. 105, no 2, pp. 15–20.
- [3] Шаталов К.В., Горюнова А.К., Лихтерова Н.М., Иванкин А.Н., Бабурина М.И., Куликовский А.В. Применение продуктов сульфатцеллюлозного производства в качестве присадок к топливам реактивных двигателей // *Вестник МГУЛ – Лесной вестник*, 2016. Т. 20. № 6. С. 107–115.
- [4] Чинь Х.Ф., Царев Г.И., Рощин В.И. Модификация таллового масла лиственных пород // *ИВУЗ. Лесной журнал*, 2014, № 2 (338). С. 123–129.
- [5] Breuer T.E. Dimer Acids. Van Nostrand's Encyclopedia of Chemistry. New York: Wiley-Interscience, 2005, 1856 p.
- [6] Владимирова Т.М., Третьяков С.И., Жабин В.И., Коптелов А.Е. Получение и переработка талловых продуктов. Архангельск: АГТУ, 2008. 155 с.
- [7] Vedernikov D.N., Roshchin V.I. Extractive compounds of betulaceae family birch buds (*Betula pendula* Roth.): v. composition of triterpene seco-acids // *Russian J. of Bioorganic Chemistry*, 2012, v. 38, no 7, pp. 762–768.
- [8] Иванкин А.Н., Куликовский А.В. Вострикова Н.Л., Чернуха И.М. Цис-, транс-конформационные изменения бактериальных жирных кислот в сравнении с аналогами животного и растительного происхождения // *Прикладная биохимия и микробиология*, 2014. Т. 50. № 6. С. 604–611.
- [9] Jing G., Yu H., Sun Z., Zhen Z. Прогресс в области депрессорных присадок к биодизельному топливу // *Нефтехимия*, 2019. Т. 59. № 5. С. 575–579.
- [10] Иванкин А.Н., Болдырев В.С., Жилин Ю.Н., Олиференко Г.Л., Бабурина М.И., Куликовский А.В. Макрокинетическая трансформация природных липидов для получения моторного топлива // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2017. № 5. С. 95–108. DOI: 10.18698/1812-3368-2017-5-95-108
- [11] Matusova T.N., Loginov S.A., Polina E.V., Vyzhgorodskii B.N. Improvement of the lubricating properties of diesel fuels // *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2002, v. 38, no 3, pp. 167–170.
- [12] Andrawes F., Chang T., Scharrer R. Analysis of volatiles in tall oil by gas chromatography, flame-photometric detection, flame-ionization detection and mass spectrometry // *J. of Chromatography A*, 1989, v. 46812, no 5, pp. 145–155.
- [13] Иванкин А.Н., Олиференко Г.Л., Куликовский А.В., Чернуха И.М., Семенова А.А., Спиридонов К.И., Насонова В.В. Определение ненасыщенных жирных кислот с мигрирующей двойной связью в сложных биологических матрицах. Пламенно-ионизационное и масс-спектрометрическое детектирование // *Журнал аналитической химии*, 2016. Т. 71. № 11. С. 1188–1195.
- [14] Pereira E., Napp A., Braun J.V., Fontoura L.A.M., Vainstein M.H. Development and validation of analytical methodology by GC-FID using hexadecyl propanoate as an internal standard to determine the bovine tallow methyl esters content // *J. of Chromatography B*, 2018, v. 1093, no 9, pp. 134–140.
- [15] Pasupuleti D., Pierce K., Eiceman G.A. Gas chromatography with tandem differential mobility spectrometry of fatty acid alkyl esters and the selective detection of methyl linolenate in biodiesels by dual-stage ion filtering // *J. of Chromatography A*, 2015, v. 142120, no 11, pp. 162–170.
- [16] Ashraf-Khorassani M., Isaac G., Rainville P., Fountain K., Taylor L.T. Study of Ultra High Performance Supercritical Fluid Chromatography to measure free fatty acids with out fatty acid ester preparation // *J. of Chromatography B*, 2015, v. 9971, no 8, pp. 45–55.
- [17] Hori K., Koriyama N., Omori H., Kuriyama M., Arishima T., Tsumura K. Simultaneous determination of 3-MCPD fatty acid esters and glycidol fatty acid esters in edible oils using liquid chromatography time-of-flight mass spectrometry // *LWT – Food Science and Technology*, 2012, v. 48, no 10, pp. 204–208.
- [18] Kamiński M., Gilgenast E., Przyjazny A., Romanik G. Procedure for and results of simultaneous determination of aromatic hydrocarbons and fatty acid methyl esters in diesel fuels by high performance liquid chromatography // *J. of Chromatography A*, 2006, v. 1122, no 6, pp. 153–160.

Сведения об авторах

Иванкин Андрей Николаевич — д-р хим. наук, профессор кафедры химии и химических технологий лесного комплекса, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), aivankin@mgul.ac.ru

Зарубина Анжелла Николаевна — канд. техн. наук, доцент, заведующая кафедрой химии и химических технологий лесного комплекса, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), zarubina@mgul.ac.ru

Кулезнев Алексей Сергеевич — студент, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), kuleznev00@mail.ru

Зенкин Александр Николаевич — магистрант, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), zensanches@mail.ru

Куликовский Андрей Владимирович — канд. техн. наук, зав. лабораторией, ФГБНУ ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН, a.kulikovskii@fnscps.ru

Поступила в редакцию 07.09.2020.

Принята к публикации 12.10.2020.

MINOR COMPONENTS DETERMINATION OF TALL OIL-BASED BIOFUELS THAT AFFECT ENVIRONMENT DURING COMBUSTION

A.N. Ivankin¹, A.N. Zarubina¹, A.C. Kuleznev¹,
A.N. Zenkin¹, A.V. Kulikovskii²

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

²V.M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences, 26, Talalikhina st., 109316, Moscow, Russia

aivankin@mgul.ac.ru

The results of determining the components of biofuel obtained from tall oil by transesterification in the presence of methanol are presented. It is shown that the main components of the feedstock and product based on it are natural fatty acids and their derivatives, the total mass fraction of which can be more than 80 %. The composition of the used raw material and the product of its processing — a mixture of FA methyl esters, contains impurities of organic compounds of natural origin, the amount of which ranges from 0,001 to 3 %. It is expedient to determine lipid components with an accuracy of ± 20 % by gas chromatography with flame ionization detection, which establishes the presence of individual FAs in the mixture at a level from 0,1 to 40 %. Analysis of the composition of minor components with a low content from 0,001 to 0,1 % can be carried out by chromatography with a mass-selective detector. It is shown that a lot of organic compounds of natural origin are found in the biofuel product, the list of which includes substituted derivatives of amines, heteroalcohols, alkenes, oxiranes, acetals. The product is obtained from vegetable raw materials and contains residues of biochemical substances of wood origin. The total amount of such compounds with chromatographic mobility up to 10 min, 10...20 min, and more than 20 min in the analysis did not exceed 1,5...2 %. The minimum concentration of some compounds was less than 0,001 % of the total components. The analyzed biodiesel samples obtained from distilled TM did not contain, according to the mass spectrometry data, harmful impurities of bromine, iodine, phosphorus and sulfur-substituted organic compounds. In the work, the conditions for determining the complete pool of minor compounds were selected, and the influence of the composition of analytes on the analysis result was discussed. A conclusion is made about the potential environmental safety of liquid biofuel based on HM due to its component composition, which provides generally safe fuel combustion in engines of technical devices.

Keywords: biofuel, fatty acids, gas chromatography, flame ionization detector, mass spectrometric detector

Suggested citation: Ivankin A.N., Zarubina A.N., Kuleznev A.S., Zenkin A.N., Kulikovskii A.V. *Opreделение minornykh komponentov biotopliva, izgotovlennogo na osnove tallovogo masla, vliyayushchikh na ekologicheskuyu bezopasnost' pri sgoranii* [Minor components determination of tall oil-based biofuels that affect environment during combustion]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 1, pp. 89–99. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-89-99

References

- [1] Aro T., Fatehi P. Tall oil production from black liquor: Challenges and opportunities. *Separation and Purification Technology*, 2017, v. 17524, no 3, pp. 469–480.
- [2] Uusi-Kyyny P., Pakkanen M., Linnekoski J., Alopaeus V. Hydrogen solubility measurements of analyzed tall oil fractions and a solubility model. *The J. of Chemical Thermodynamics*, 2017, v. 105, no 2, pp. 15–20.
- [3] Shatalov K.V., Goryunova A.K., Likhterova N.M., Ivankin A.N., Baburina M.I., Kulikovskiy A.V. *Primenenie produktov sul'fatsellyuloznogo proizvodstva v kachestve prisadok k toplivam reaktivnykh dvigateley* [The use of cellulose sulfate products as additives to jet engine fuels] *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*, 2016, t. 20, no. 6, pp. 107–115.
- [4] Chin' Kh.F., Tsarev G.I., Roshchin V.I. *Modifikatsiya tallovogo masla listvennykh porod* [Modification of tall oil of hardwood]. *Lesnoy Gurnal* [News of higher educational institutions. Forest magazine], 2014, v. 338, no. 2, pp. 123–129.
- [5] Breuer T.E. Dimer Acids. *Van Nostrand's Encyclopedia of Chemistry*. New York: Wiley-Interscience, 2005, 1856 p.
- [6] Vladimirova T.M., Tret'yakov S.I., Zhabin V.I., Koptelov A.E. *Poluchenie i pererabotka tallovykh produktov* [Receiving and processing of tall products: monograph]. Arkhangelsk: Publishing house ASTU, 2008, 155 p.
- [7] Vedernikov D.N., Roshchin V.I. Extractive compounds of betulaceae family birch buds (*Betula pendula* Roth.): v. composition of triterpene seco-acids. *Russian J. of Bioorganic Chemistry*, 2012, v. 38, no 7, pp. 762–768.
- [8] Ivankin A.N., Kulikovskii A.V., Vostrikova N.L., Chernuha I.M. Cis-, trans-conformational changes in bacterial fatty acids in comparison with analogues of animal and plant origin. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2014, vol. 50, no. 6, pp. 668-674. doi: 10.7868/S0555109914060051
- [9] Jing G., Yu H., Sun Z., Zhen Z. *Progress v oblasti depressornykh prisadok k biodizel'nomu toplivu* [Progress in the field of depressant additives for biodiesel fuel]. *Neftekhimiya*, 2019, v. 59, no. 5, pp. 575–579.
- [10] Ivankin A.N., Boldyrev V.S., Zhilin Yu.N., Oliferenko G.L., Baburina M.I., Kulikovskiy A.V. *Makrokineticheskaya transformatsiya prirodnnykh lipidov dlya polucheniya motornogo topliva* [Macrokinectic Transformation of Natural Lipids for Motor Fuels Production]. *Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.*, 2017, no. 5, pp. 95–108. DOI: 10.18698/1812-3368-2017-5-95-108
- [11] Matusova T.N., Loginov S.A., Polina E.V., Vyzhgorodskii B.N. Improvement of the lubricating properties of diesel fuels. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2002, v. 38, no 3, pp. 167–170.
- [12] Andrawes F., Chang T., Scharrer R. Analysis of volatiles in tall oil by gas chromatography, flame-photometric detection, flame-ionization detection and mass spectrometry. *J. of Chromatography A*, 1989, v. 46812, no 5, pp. 145–155.

- [13] Ivankin A.N., Oliferenko G.L., Kulikovskiy A.V., Chernukha I.M., Semenova A.A., Spiridonov K.I., Nasonova V.V. *Opredelenie nenasyshchennykh zhirnykh kislot s migriruyushchey dvoynoy svyaz'yu v slozhnykh biologicheskikh matritsakh. Plamennonizatsionnoe i mass-spektrmetricheskoe detektirovanie* [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. of Analytical Chemistry*, 2016, v. 71, no. 11, pp. 1131–1137. DOI: 10.1134/S1061934816110046
- [14] Pereira E., Napp A., Braun J.V., Fontoura L.A.M., Vainstein M.H. Development and validation of analytical methodology by GC-FID using hexadecyl propanoate as an internal standard to determine the bovine tallow methyl esters content. *J. of Chromatography B*, 2018, v. 1093, no 9, pp. 134–140.
- [15] Pasupuleti D., Pierce K., Eiceman G.A. Gas chromatography with tandem differential mobility spectrometry of fatty acid alkyl esters and the selective detection of methyl linolenate in biodiesels by dual-stage ion filtering. *J. of Chromatography A*, 2015, v. 142120, no 11, pp. 162–170.
- [16] Ashraf-Khorassani M., Isaac G., Rainville P., Fountain K., Taylor L.T. Study of Ultra High Performance Supercritical Fluid Chromatography to measure free fatty acids with out fatty acid ester preparation. *J. of Chromatography B*, 2015, v. 9971, no 8, pp. 45–55.
- [17] Hori K., Koriyama N., Omori H., Kuriyama M., Arishima T., Tsumura K. Simultaneous determination of 3-MCPD fatty acid esters and glycidol fatty acid esters in edible oils using liquid chromatography time-of-flight mass spectrometry. *LWT – Food Science and Technology*, 2012, v. 48, no 10, pp. 204–208.
- [18] Kamiński M., Gilgenast E., Przyjazny A., Romanik G. Procedure for and results of simultaneous determination of aromatic hydrocarbons and fatty acid methyl esters in diesel fuels by high performance liquid chromatography. *J. of Chromatography A*, 2006, v. 1122, no 6, pp. 153–160.

Authors' information

Ivankin Andrey Nikolayevich — Dr. Sci. (Chem.), Professor of the Department of Chemistry BMSTU (Mytishchi branch), aivankin@mgul.ac.ru

Zarubina Angela Nikolaevna — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Department of Chemistry and Chemical Technologies of the Forest Complex of BMSTU (Mytishchi branch), zarubina@mgul.ac.ru

Kuleznev Aleksey Sergeevich — Student of BMSTU (Mytishchi branch), caf-htdip@mgul.ac.ru

Zenkin Aleksandr Nikolaevich — Master of BMSTU (Mytishchi branch), zensanches@mail.ru

Kulikovskii Andrey Vladimirovich — Cand. Sci. (Tech.), Head of the Laboratory of the V.M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences, a.kulikovskii@fneps.ru

Received 07.09.2020.

Accepted for publication 12.10.2020.

ГИБРИДНОЕ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ ЖИЛЫХ ПОСЕЛЕНИЙ В РФ

**В.П. Галкин¹, А.А. Горяев², Н.Б. Баланцева², О.А. Калиничева²,
А.А. Калинина¹, А.В. Сиротов¹, Я.В. Тарлаков¹, М.С. Усачев¹**

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

²ФГАОВ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», 163002, г. Архангельск, Наб. Северной Двины, д. 17

vgalkin@mgul.ac.ru

Рассмотрен пример использования возобновляемых источников энергии в условиях населенного пункта Архангельской обл., типичного для средней полосы России. Проанализирована возможность использования энергии ветра и солнца для обеспечения электроэнергией бытовых потребителей на примере одного дома жилой площадью 60 м². Приведены расчеты и определены параметры ветроустановки, солнечных батарей и аккумуляторов, исходя из обеспечения электроэнергией от ветроустановки и аккумулятора, поскольку в несолнечное время и безветренные дни, как правило, работает солнечная батарея. На основе проведенных расчетов определены параметры и выбран инвертор для предложенной системы электрообеспечения.

Ключевые слова: возобновляемая энергетика, дизель-генератор, электроснабжение, электротехника, возобновляемые источники энергии, ветроустановка, солнечная батарея, аккумуляторы

Ссылка для цитирования: Галкин В.П., Горяев А.А., Баланцева Н.Б., Калиничева О.А., Калинина А.А., Сиротов А.В., Тарлаков Я.В., Усачев М.С. Гибридное энергообеспечение жилых поселений в РФ // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 1. С. 100–108. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-100-108

Большее половины территории России, на которой проживает около 20 млн чел., не обеспечены централизованным электроснабжением. Эту функцию в различных районах страны выполняют многочисленные дизель-генераторы. Для их работы необходимы постоянные поставки дизельного топлива, что иногда связано с некоторыми сложностями. В северные районы, на острова, а также в удаленные районы РФ доставка дизельного топлива осуществляется водным транспортом в период навигации, а это значительно повышает стоимость топлива, которое необходимо доставлять сразу на весь межнавигационный период. Поэтому в перечисленных районах устанавливаются высокие тарифы на электроэнергию. К тому же практически половина российских населенных пунктов до сих пор не газифицирована, прежде всего, в связи с бескрайними просторами страны. В негазифицированных районах наиболее экономичным решением представляется гибридное энергообеспечение с использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [1, 2]. В РФ отмечается около 120 тыс. жилых поселений с количеством населения менее 200 чел. Энергетика для таких поселений, как правило, небольшой мощности, а обеспечение электро- и теплоснабжение от централизованных сетей требует строительства новых электрических, тепловых и газовых сетей большой протяженности, что достаточно затратно. Так, на прокладку электрических сетей затраты могут составить не менее 800...1000 тыс. руб./км, газовых — до 350 тыс. руб./км. Потери энергии в электрических сетях составляют от 20 до 30 %, в тепло-

вых — до 60 %, а плата за подключение — более 50 тыс. руб./кВт [3, 4]. Кроме того, повышение тарифов на углеводородное сырье, их ограниченный объем, проблемы экологии, в частности загрязнение окружающей среды, ухудшают условия жизни населения.

Цель работы

Цель работы — расчет гибридного энергообеспечения на основе совместного использования ВИЭ и традиционных источников, а также определение параметров и выбор инвертора для предложенной системы электрообеспечения.

Анализ литературных источников [1–4] показал, что ВИЭ рационально внедрять в населенных пунктах со среднегодовой скоростью ветра не ниже 5 м/с, среднемесячной солнечной инсоляцией в весенне-летний период 100...150 кВт·ч/м², которые расположены вдоль берегов рек со скоростью течения воды 3 м/с и более. Кроме того, в этих поселениях должна быть возможность использования тепловых насосов для отопления помещений и горячего водоснабжения. В сельской местности, как правило, используют печное отопление, а в качестве топлива — дрова, популярны бани, где топливом также являются дрова. Для ежедневного нагревания воды в быту можно установить электрический водонагреватель емкостью 50...100 дм³. Электричество, кроме того, необходимо для питания бытовых электроприборов. Выбор схемы электроснабжения для таких случаев должен осуществлять муниципалитет и непосредственно жителями поселений. Если среднегодовая скорость ветра в

приземном слое атмосферы составляет 6...7 м/с, основой электроснабжения могут быть ветроустановки. При среднегодовой солнечной инсоляции 1100 кВт·ч/м² и выше основными могут быть солнечные модули. При быстром течении вод в реках используется малая гидроэнергетика. При необходимости отопления помещений и горячего водоснабжения применяют тепловые насосы или электродкотлы. Таким образом, комбинируя ВИЭ, можно сократить доставку дизельного топлива и угля на 80...100 %.

Материалы и методы исследования

Рассмотрим типичный пример для средней полосы России. Населенный пункт расположен на 62° с. ш. в Архангельской обл. Среднегодовая скорость ветра в приземном слое атмосферы на высоте флюгера 14 м составляет 4,4 м/с, на высоте 20 м — 4,8 м/с. Среднегодовая солнечная инсоляция 982 кВт·ч/м². Дома деревянные бревенчатые, утепленные. Жилая площадь одного дома — 60 м², высота потолков — 2,7 м. Объем помещений — 162 м³. Для отопления 10 м² × 2,7 м = 27 м³ требуется 0,9 кВт, а всего 162 : 27 × 0,9 = 5,4 кВт. Отопительный период — 7 мес. Среднемесячные температуры в мае и сентябре — +8 °С. Возможные бытовые электроприборы в одном доме приведены в табл. 1.

Итого в сутки без отопления для имеющегося бытового электрооборудования требуется 8,5 кВт·ч электроэнергии. С отоплением в течение 7 мес. суточная потребность в электроэнергии возрастает до 13,9 кВт·ч. В пиковые часы — с 6.00 и с 18.00 одновременно могут быть включены такие приборы, как холодильник (мощность 0,16 кВт), электрочайник, микроволновая печь и электромясорубка по очереди (1,5 кВт), лампы накаливания (0,1 кВт), водяной насос (0,2 кВт), электроплитка (1 кВт), телевизор (0,2 кВт). Всего потребуется примерно 3,2 кВт мощности. Однако если учесть замену печного вида отопления на другой дополнительно понадобится источник энергии мощностью 5,4 кВт или следует предусмотреть тепловой насос.

Результаты и обсуждение

В первую очередь рассмотрим возможность использования энергии ветра и солнца для обеспечения бытовых электроприборов без отопления (рис. 1).

Удельная мощность ветрового потока определяется по формуле [3]

$$N_0 = 1,17SV^3_{cp}, \text{ Вт}, \quad (1)$$

где S — площадь поперечного сечения ветрового потока, 1 м²;

V_{cp} — среднемесячная скорость ветра, м/с.

Годовая удельная энергия ветрового потока $W_{уд.п}$ (энергия, протекающая за 1 год через 1 м² поперечного сечения обитаемой площади) зависит от повторяемости скоростей ветра, т. е. какую долю годового времени t_i ветер дул со скоростью v_i

$$W_{уд.п} = \frac{1}{2} \rho T \sum_{i=1}^k t_i v_i^3, \quad (2)$$

где k — число градаций ветра;

T — число часов в году, 8760 ч.

Т а б л и ц а 1

Электробытовые приборы в одном доме

Household appliances in a house

Наименование	Количество	Установленная мощность, кВт	Продолжительность работы, ч./неделя	Потребление энергии в неделю, кВт·ч
Холодильник	1	0,16	13,44	2,15
Стиральная машина	1	2,0	4,0	8,0
Утюг	1	1,0	2,0	2,0
Электрочайник	1	1,5	1,1	1,65
Микроволновая печь	1	1,5	1,1	1,65
Энергосберегающие лампы	10	0,1	2,8	0,28
Настольная лампа	1	0,01	0,14	0,0014
Водонагреватель 100 дм ³	1	2,0	14	28
Водяной насос	1	0,2	1,4	2,8
Электромясорубка	1	1,0	0,56	0,56
Электроплитка	1	1,0	7	7,0
Телевизор	1	0,2	28	5,6
Компьютер	1	0,16	14	2,24
Итого	—	10,83		59,44

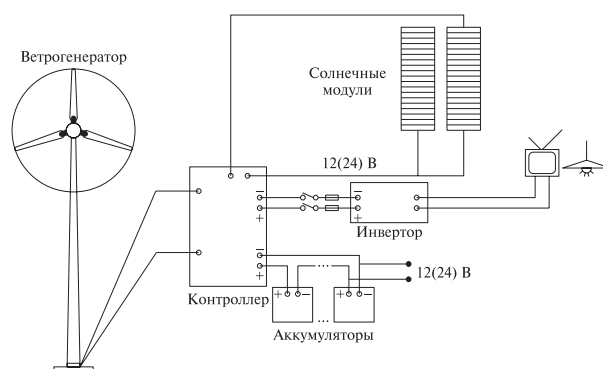


Рис. 1. Автономное энергообеспечение солнечной батареи и ветроустановки (с аккумуляторами)

Fig. 1. Autonomous power supply of solar cell and wind turbine (with batteries)

Т а б л и ц а 2

Метеорологические данные [1] и расчет мощности ветроустановки

Meteorological data [1] and wind turbine calculation

Наименование	Месяц года												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Средняя месячная и годовая температура атмосферного воздуха, °С	-12,4	-11,7	-7,1	1,2	8,2	13,6	16,5	13,7	8,2	1,6	-4,4	-9,9	1,3
Средняя месячная и годовая скорость ветра на высоте флюгера 14 м, м/с	4,5	4,8	4,6	4,5	4,6	4,1	3,6	3,4	4,0	4,7	5,1	4,9	4,4
Удельная мощность ветрового потока на высоте 14 м, $S = 1 \text{ м}^2$, Вт/м ²	107	129	114	107	114	81	55	46	75	121	155	138	100
Удельная мощность ветроустановки на высоте 14 м, $\varepsilon = 0,35$, $S = 1 \text{ м}^2$, $\eta = 0,85$, Вт/м ²	32	39	34	32	34	24	16	14	22	36	46	41	30
Скорость ветра на высоте 20 м, м/с	4,9	5,2	5,0	4,9	5,0	4,4	3,9	3,7	4,3	5,1	5,5	5,3	4,8
Удельная мощность ветрового потока на высоте 20 м, $S = 1 \text{ м}^2$, Вт/м ²	137	164	146	137	146	99	69	59	93	155	194	174	131
Удельная мощность ветроустановки на высоте 20 м, $S = 1 \text{ м}^2$, $\varepsilon = 0,35$, Вт/м ²	48	57	51	48	51	35	24	21	33	54	68	61	46
Месячная потребность в электроэнергии, кВт·ч	264	238	264	255	264	255	264	264	255	264	255	264	3106
Количество штительных дней, %/дни	1/0,3	2/0,5	2/0,6	3/2,7	2/1,7	1/0,3	2/0,6	3/2,8	3/2,7	2/0,6	1/0,3	2/0,6	2/7,3
Продолжительность дня, ч.	6	8,85	11,4	14,4	17,7	19,6	18,3	15,6	12,7	9,8	6,9	5,3	12,2
Скорость ветра, м/с	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Среднемесячная удельная энергия ветрового потока W , при среднегодовой скорости ветра 4,8 м/с на высоте 20 м, (Вт·ч)/(м ² ·год), (см. рис. 3)	0,048	0,56	3,9	9,4	20,6	32,4	37,7	36,4	35	18	9,3	8,6	

Зная среднегодовую скорость ветра, его вертикальный профиль и повторяемость скорости ветра, можно дать энергетическую характеристику ветрового потока в любом районе.

Удельная мощность ветроустановки изолированного потребителя ($N_{п}^{в.у}$) определяется по формуле

$$N_{п}^{в.у} = 1,17SV^3_{ср}\varepsilon\eta_{в.у} \text{ Вт}, \quad (3)$$

где ε — коэффициент мощности, 0,35;

$\eta_{в.у}$ — КПД ветроустановки, 0,85.

Расчет приведен в табл. 2.

Ветроустановки, изготавливаемые промышленностью, рассчитываются на номинальную скорость ветра (8...12,5 м/с). Удельная номинальная мощность определяется для того, чтобы подобрать марку ветроустановки, которые изготавливаются промышленностью.

При среднегодовой скорости ветра на уровне флюгера 14 м — 4,4 м/с удельная мощность ветроустановки равна 30 Вт/м². При расчетной скорости ветра 8 м/с удельная ее мощность равна 180 Вт/м², а при расчетной скорости ветра 10 м/с — 349 Вт/м².

На рис. 2, 3 представлено, как формируется годовая сумма удельной энергии ветра (площадь под кривой $W_{уд}$) при среднемесячной скорости ветра. Вследствие кубической зависимости мощности от скорости ветра наибольший вклад дают не наиболее часто наблюдаемые и даже не средние скорости ветра, а скорости, превышающие последние в 1,6–1,8 раза.

При скорости ветра от 0 до 3 м/с ветроустановка не вырабатывает электроэнергию (табл. 3), поэтому она работает не круглый год. При среднегодовой скорости 4,4 м/с время работы ветроустановки составит $8760 \cdot 0,793 = 6947$ ч (290 дней). При среднегодовой скорости 4,8 м/с на высоте 20 м время ее работы составит $8760 \cdot 0,859 \approx 7353$ ч (313,5 дней). Годовая потребность в электроэнергии $E_r = 3106$ кВт·ч. Количество электроэнергии, выработанное ветроустановкой в течение года (при $V_r = 4,4$ м/с), определяется по формуле

$$E_{в.у} = \frac{E_r \cdot \tau}{365} = \frac{3106 \cdot 290}{365} = 2462 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Средняя развиваемая мощность ветроустановки ($N_{в.у}$) рассчитывается следующим образом

$$N_{в.у} = \frac{E_r}{24 \cdot 290 \cdot \eta_{в.у}} = \frac{2462}{24 \cdot 290 \cdot 0,85} = 0,42 \text{ кВт}.$$

Требуемая мощность воздушного потока (N_0) составит

$$N_0 = \frac{N_{в.у}}{\varepsilon} = \frac{0,42}{0,35} = 1,2 \text{ кВт}.$$

Определяем радиус R ветроколеса ($1 \text{ кВт} = 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^3$)

$$R = \sqrt{\frac{N_0}{1,17 \cdot 3,14 \cdot 4,4^3}} = \sqrt{\frac{1200}{313}} = 1,96 \text{ м}; \quad D \approx 4 \text{ м}.$$

Определяем ометаемую площадь ветроколеса $S_{вк}$

$$S_{вк} = 0,785 \cdot D^2 = 12,6 \text{ м}^2.$$

Мощность установленной ветроустановки ($N_{уст}$) при расчетной скорости ветра $V_{рас} = 10$ м/с

$$N_{уст} = 0,5 \rho \eta_{в.у} S_{вк} \cdot 10^3 \cdot 10^{-3} =$$

$$= 0,5 \cdot 1,225 \cdot 0,35 \cdot 0,85 \cdot 12,6 = 2,3 \text{ кВт}.$$

При расчетной скорости ветра 12 м/с $N_{уст} = 4$ кВт.

Покупать ветроустановку следует с учетом расчетной скорости ветра.

Рассмотрим расчет и подбор системы солнечной батареи. Выработка энергии солнечной батареей рассчитывается (см. табл. 2) по формуле

$$E_{с.б} = \frac{E_{инс} \cdot P_{с.б} \cdot \eta}{P_{инс}}, \quad (4)$$

где $E_{с.б}$ — выработка энергии солнечной батареей, кВт·ч;

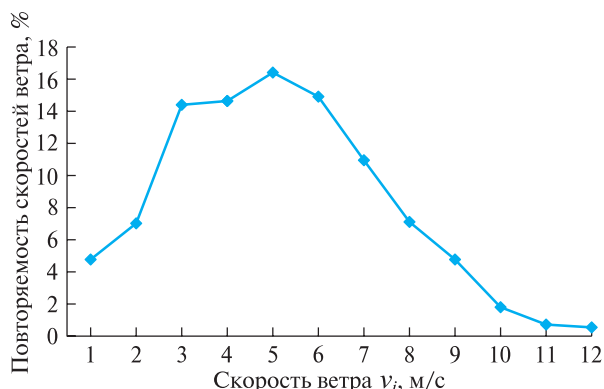


Рис. 2. Повторяемость скорости ветра при высоте ветроколеса 20 м

Fig. 2. Repetition of wind speed at 20 m wind wheel height

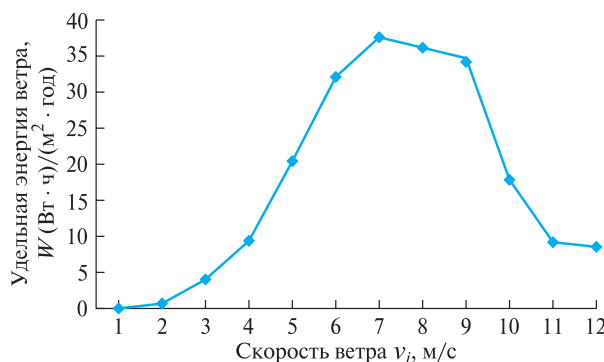


Рис. 3. Распределение годовой удельной энергии ветра на высоте 20 м.

Fig. 3. Distribution of annual specific wind energy at 20 m height

Т а б л и ц а 3

Повторяемость скорости ветра (по Поморцеву М.М.), %

Repetition of wind speed (by Pomortsev M.M.), %

Скорость ветра, м/с	Среднегодовая скорость ветра, м/с								
	1	2	3	4	4,4	4,8	5,2	5,5	5,7
0	25,4	10,0	5,7	3,5	2,9	2,3	1,8	1,5	1,3
1	41,0	23,0	11,8	7,2	6,0	4,8	4,5	3,9	2,1
2	25,1	29,6	19,4	12,2	11,2	7,0	6,3	6,3	3,9
3	7,5	23	22,7	16,5	14,5	14,5	10,2	9,8	9,0
4	1,0	10,0	19,5	18,5	17,1	14,7	14,2	13,0	12,2
5		3,8	12,0	16,5	16,5	16,5	16,0	15,2	13,0
6		0,6	6,0	12,2	13,4	15,0	15	15,0	15
7			2,2	7,2	8,2	11,0	12,4	13,0	13,3
8			0,7	3,6	5,4	7,1	8,7	9,7	9,0
9				1,7	2,7	4,8	5,1	6,2	6,9
10				0,6	1,2	1,8	2,6	3,5	6,0
11				0,3	0,5	0,7	1,3	1,9	2,9
12						0,5	0,6	1,1	1,3
13									0,3

$E_{инс}$ — месячная инсоляция квадратного метра, кВт·ч/м²;

$P_{с.б}$ — номинальная мощность солнечной батареи, заявленная потребителем, кВт;

η — КПД передачи электроэнергии по проводам, контроллера и инвертора, равный 0,8;

$P_{инс}$ — максимальная мощность инсоляции с 1 м² земной поверхности — 1 кВт (см. табл. 2).

Номинальная мощность солнечной батареи, требуемая для обеспечения необходимой месячной выработки электроэнергии рассчитывается по формуле

$$P_{с.б} = \frac{P_{инс} \cdot E_{с.б}}{E_{инс} \cdot \eta}, \text{ кВт.} \quad (5)$$

В несолнечное время суток (в среднем это 12 ч) с апреля по сентябрь электроэнергией должны обеспечивать аккумуляторы и ветроустановка. Кроме того, важно предусмотреть обеспечение электроснабжением на один штилевой день в период с апреля по сентябрь, т. е. 8,5 (кВт·ч)/сут.

Исходя из перечня бытовых электроприборов (см. табл. 1), определяем основные параметры инвертора для системы. Во-первых, поскольку в списке бытовых электроприборов есть устройства, имеющие в своем составе двигатели: холодильник, стиральная машина и т. д., необходим инвертор, имеющий на выходе синусоидальную форму напряжения. Во-вторых, входное напряжение инвертора должно соответствовать выбранному напряжению — не ниже 24 В в целях уменьшения токовой нагрузки на провода. Мощность инвертора принимается на 20 % больше максимальной среднечасовой нагрузки потребления. Выбираем мощность инвертера для дома с учетом потерь: $3,3 \text{ кВт} \cdot 1,2 = 3,96 \text{ кВт}$ [5–11].

Выбираем инвертор мощностью 4 кВт, напряжением 24 В.

При расчете аккумуляторных батарей учитываются следующие особенности:

- разряжение аккумуляторов на большую «глубину разряда» приводит их в негодность, значительно сокращается срок службы;

- ориентироваться следует на 20-, 30 %-ю глубину разряда, а также на свинцово-кислотные аккумуляторы, поскольку они дешевле по сравнению с современными аналогами;

- исходя из безопасности при эксплуатации, рекомендуется использовать герметизированные аккумуляторы — не герметизированные при работе выделяют вредные для дыхания человека и взрывоопасные газы, а для их установки необходимо выбирать хорошо проветриваемое помещение;

- по эксплуатационным характеристикам для автономной системы наиболее подходят необслуживаемые гелевые аккумуляторы (GEL), хотя они не являются самыми дешевыми;

- важен уровень температуры окружающей среды для расчета необходимой емкости аккумуляторов, особенно если приходится их эксплуатировать в холодное время года, пониженная температура окружающей среды снижает емкость аккумулятора, т. е. его энергоемкость.

Кроме того, в ходе расчета важно знать некоторые тонкости.

В частности, количество штилевых последовательных дней следует принять за 1. При этом питание может быть только от солнечной, аккумуляторной батареи или дизельной электростанции. В безветренный день, как правило, работает солнечная батарея. В штилевые дни или часы, а их количество в году — 175 ч. (только в августе и сентябре), можно уменьшить количество аккумуляторов и как можно меньше включать электроприборы.

Если в штилевой день пасмурный, то емкость аккумуляторной батареи будет составлять

$$\frac{8500 \text{ Вт} \cdot \text{ч}}{12 \text{ В}} = 708 \text{ А} \cdot \text{ч}.$$

Введем глубину разряда для аккумуляторной батареи — 30 %:

$$\frac{708 \text{ А} \cdot \text{ч}}{0,3} = 2360 \text{ А} \cdot \text{ч}.$$

Считаем, что аккумуляторная батарея находится в помещении с положительной температурой.

Номинальная емкость выбранного аккумулятора — 200 А·ч, напряжение — 12 В.

Число аккумуляторов, соединенных параллельно:

$$\frac{2360 \text{ А} \cdot \text{ч}}{200 \text{ А} \cdot \text{ч}} = 11,8 \approx 12 \text{ шт.}$$

Число аккумуляторов, соединенных последовательно:

$$\frac{24 \text{ В}}{12 \text{ В}} = 2 \text{ шт.}$$

Общее количество аккумуляторов:

$$12 \cdot 2 = 24 \text{ шт.}$$

Если установить аккумуляторы напряжением 24 В, то их количество уменьшится в 2 раза.

Рассчитаем количество фотоэлектрических модулей. Выбираем монокристаллический солнечный модуль мощностью 200 Вт, напряжением 24 В. Для расчета энергии солнечной батареи необходимо прежде всего определить солнечную инсоляцию региона, в котором будет эксплуатироваться система [12, 13] (табл. 4).

1. Суточная потребность в электроэнергии составляет 8500 Вт·ч.

Т а б л и ц а 4

**Суммарная инсоляция и выработка электроэнергии солнечной батареей,
кВт·ч/м² при наклоне площадки 45°**

Total insolation and power generation by solar panel, kWh/ m²at the 45° inclination

Показатель	Месяц года												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Суммарная месячная инсоляция при наклоне площадки 45°, кВт·ч/м ²	16,4	41	112	127,5	142	150	156	117	72	34	12	3,3	982
Месячная потребность электроэнергии, кВт·ч	264	238	264	255	264	255	264	264	255	264	255	264	3106
Месячная выработка электроэнергии ветроустановкой при S = 12,6 м ² , на высоте h = 14 м, кВт·ч	297	326	317	287	317	218	152	128	202	338	419	384	3385
Месячная выработка электроэнергии солнечной батареей мощностью 2,6 кВт, при η = 0,8, кВт·ч	34	85	233	265	295	312	324	243	149	71	25	7	2043
Месячная выработка электроэнергии солнечной батареей мощностью 2,0 кВт, при η = 0,8, кВт·ч	26	66	179	204	227	240	250	187	115	54	19	5	1572
Совместная выработка электроэнергии солнечной батареей мощностью 2 кВт и ветроустановкой, кВт·ч	323	392	496	491	544	458	402	315	317	409	438	391	4957

2. Потери на заряд-разряд составляют не более 20 %, их важно учесть

$$8500 \text{ Вт} \cdot \text{ч} \cdot 1,2 = 10\,200 \text{ Вт} \cdot \text{ч}.$$

3. Среднее количество пиковых часов в апреле составляет 4,2.

4. Требуемая мощность солнечной батареи

$$\frac{10\,200 \text{ Вт} \cdot \text{ч/сут}}{4,2 \text{ ч}} = 2429 \text{ Вт}.$$

5. Пиковая мощность фотоэлектрического модуля в точке максимальной мощности — 200 Вт, напряжение 24 В.

6. Число модулей, соединенных параллельно

$$\frac{2429 \text{ Вт}}{200 \text{ Вт}} = 12,14 \text{ шт}.$$

7. Увеличиваем до ближайшего целого числа — 13 шт.

8. Число модулей соединенных последовательно

$$\frac{24 \text{ В}}{24 \text{ В}} = 1 \text{ шт}.$$

9. Общее количество модулей — 13 шт.

По данным табл. 4 получаем графики выработки электроэнергии солнечной батареей и ветроустановкой в течение года (рис. 4).

Из рис. 4 видно, что установленная мощность ветроустановки не обеспечивает электро-

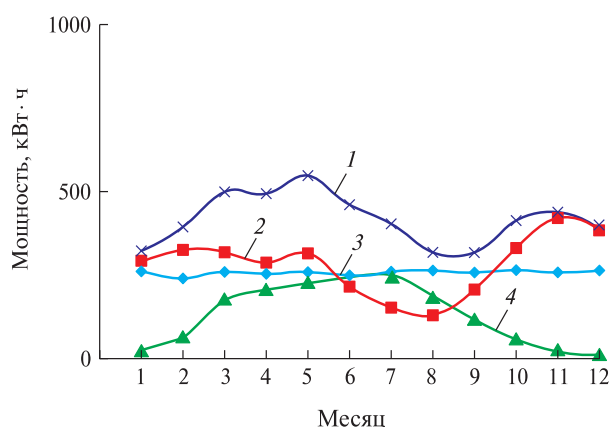


Рис. 4. Выработка электроэнергии солнечной батареей и ветроустановкой в течение года: 1 — совместная выработка электроэнергии солнечной батареей и ветроустановкой мощностью 2 кВт; 2 — выработка электроэнергии ветроустановкой; 3 — месячная потребность в электроэнергии; 4 — выработка электроэнергии солнечной батареей мощностью 2 кВт

Fig. 4. Power generation of solar panels and wind turbines during the year: 1 — joint power generation solar panels and wind turbine capacity of 2 kW; 2 — energy production by wind turbine; 3 — monthly demand for electricity; 4 — power generation solar panels of 2 kW

энергией потребителя с мая по сентябрь, поэтому источником электроэнергии должен стать другой объект. При совместной работе ветроустановки и солнечной батареи мощность солнечной батареи можно уменьшить с 2,6 кВт до 2,0 кВт. В этом

случае ветроустановка и солнечная батарея обеспечат потребителя круглогодично, а также дает возможность установить вместо 13 солнечных батарей 10 шт. [14–20].

Выводы

1. Использование гибридного энергообеспечения на основе возобновляемых источников энергии и традиционных источников является перспективным и экономически выгодным направлением обеспечения электроэнергией в условиях жилых поселений с количеством населения менее 200 чел.

2. Учитывая сезонные колебания климата рассматриваемых районов эффективным считаем комплексное использование различных возобновляемых источников электроэнергии в частности солнечной и ветровой.

3. Проведенные расчеты позволили определить, что для обеспечения электроэнергией одного дома необходимы следующие объекты:

- ветроустановка с горизонтальной или вертикальной осью мощностью 2,3 кВт (с расчетной скоростью ветра 10 м/с) или 4 кВт (с расчетной скоростью ветра 12 м/с), высотой мачты не ниже 14 м, диаметром ветроколеса 4,0...4,5 м;

- фотоэлектрические монокристаллические модули в количестве 10 шт. (при мощности 200 Вт, напряжении 24 В), вместо них можно установить солнечную электростанцию мощностью 2,0...2,5 кВт;

- инвертор мощностью 4 кВт, напряжением 24 В, преобразующий постоянный ток в переменный напряжением 220 В, частотой 50 Гц;

- контроллер МРРТ (Maximum Power Point Tracking), мощностью 4 кВт, гибридный;

- аккумуляторы гелевые необслуживаемые емкостью 200 А·ч (напряжением 12 В — 24 шт., напряжением 24 В — 12 шт.);

- кабель и провод.

Список литературы

- [1] Агроклиматический справочник по Архангельской области. Л.: Гидрометиздат, 1961. 220с.
- [2] Горяев А.А., Петухов С.В., Баланцева Н.Б. Энергообеспечение в Арктической зоне Архангельской области и Ненецкого автономного округа (НАО) // I Российская науч.-практ. конф. «Природопользование в Арктике: современное состояние и перспективы развития», Якутск, 22–25 сентября 2015 г. Якутск: СВФУ, 2015. С. 191–200.
- [3] Березкин М.Ю., Синюгин О.А. География инноваций и возобновляемая энергетика мира // Малая энергетика, 2011. № 1–2. С. 3–5
- [4] Шеповалова О.В. Использование возобновляемых источников энергии в комплексных системах энергообеспечения сельских зданий // Ползуновский вестник, 2011. № 21. С. 175–180.
- [5] Кольниченко Г.И., Сиротов А.В., Тарлаков Я.В. Исследование и обоснование эксплуатационных характеристик дизель-генератора, работающего на дизельном топливе с биодобавками // Сборник трудов III Международной конф. «Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий» (АПЭЭТ-2014), Екатеринбург, 17–20 марта 2014 г. Екатеринбург: УРФУ, 2014. С. 230–232.
- [6] BP Statistical Review of World Energy, 2016. URL: <http://www.bp.com/statisticalreview> (дата обращения 10.04.2020)
- [7] 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.
- [8] Малоизвестное оборудование для производства электроэнергии. 2016. URL: <http://nnhpe.spbstu.ru/maloizvestnoe-oborudovanie-dlya-proizvodstva-elektroenergii/> (дата обращения 15.06.2019).
- [9] Обзор электроэнергетической отрасли России, 2018. URL: <https://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/EY-power-market-russia-2018/%24FILE/EY-power-market-russia-2018.pdf> (дата обращения 10.04.2020).
- [10] Токарев Г.Г. Газогенераторные автомобили. М.: ГНТ Изд-во машиностроительной литературы, 1955. 207 с.
- [11] 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)
- [12] Елистратов В.В. Возобновляемая энергетика. СПб.: Изд-во политехнического ун-та, 2016. 424 с.
- [13] Васильев И.А., Люминарская Е.С., Селиванов К.В. Гибридная энергетика как способ электрификации географически изолированных потребителей // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2018. № 4–2 (330). С. 154–161.
- [14] Васильев И.А., Люминарская Е.С., Селиванов К.В. Автономная система энергоснабжения с микропроцессорным управлением // Электроника и электрооборудование транспорта, 2019. № 2. С. 21–26.
- [15] Селиванов К.В. Анализ способов малого распределенного электроснабжения // International research journal, 2017. № 01 (55). Ч. 4. С. 107–110.
- [16] Князева Г.А. Биоэнерготехнологии: новые направления развития регионального лесного сектора // Социально-экономические, политические и исторические аспекты развития северных и арктических регионов России: Материалы Всерос. науч. конф. (с междунар. участием). Сыктывкар, 17–18 октября 2018 г. Сыктывкар: Коми Республиканская Академия государственной службы и управления, 2018. С. 20–25.
- [17] Langholtz M.H.; Stokes B.J.; Eaton L.M. 2016 Billion-ton report: Advancing domestic resources for a thriving bioeconomy, Volume 1: Economic availability of feedstock. U.S. Department of Energy. ORNL/TM-2016/160. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN. 411p. DOI: 10.2172/1271651.
- [18] Попель О.С., Фортов В.Е. Энергетика в современном мире. Долгопрудный: Интеллект, 2011. 168 с.
- [19] 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.
- [20] 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.

Сведения об авторах

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

Горяев Аркадий Алексеевич — канд. техн. наук, доцент ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», ark16111936@gmail.com

Баланцева Наталья Борисовна — канд. техн. наук, доцент ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»

Калиничева Оксана Александровна — канд. техн. наук, доцент ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»

Сиротов Александр Владиславович — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), sirovov@mgul.ac.ru

Калинина Алена Анатольевна — вед. инженер МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), kalinina@mgul.ac.ru

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

Усачев Максим Сергеевич — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), usachev@mgul.ac.ru

Поступила в редакцию 26.05.2020.

Принята к публикации 16.11.2020.

HYBRID POWER SUPPLY OF RESIDENTIAL SETTLEMENTS IN RUSSIAN FEDERATION

V.P. Galkin¹, A.A. Gorjaev², N.B. Balantseva², O.A. Kalinicheva²,
A.A. Kalinina¹, A.V. Sirotov¹, Y.V. Tarlakov¹, M.S. Usachev¹

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

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

vgalkin@mgul.ac.ru

An example of using renewable energy sources in the conditions of a locality in the Arkhangelsk region, typical for the Central part of Russia, is considered. The possibility of using wind and solar energy to provide electricity to domestic consumers is analyzed on the example of one house with a living area of 60 sq. m. Calculations are made and parameters of the wind farm, solar panels and accumulators are determined based on the provision of electricity from the wind farm and battery, since in non-Sunny times and windless days, as a rule, the solar battery operates. Based on the calculations, the parameters were determined and an inverter was selected for the proposed power supply system.

Keywords: renewable power generation, diesel generator, power supply, electrical engineering, renewable energy sources, wind turbine, solar panel, batteries

Suggested citation: Galkin V.P., Gorjaev A.A., Balantseva N.B., Kalinicheva O.A., Kalinina A.A., Sirotov A.V., Tarlakov Y.V., Usachev M.S. *Gibridnoe energoobespechenie zhilykh poseleniy v RF* [Hybrid power supply of residential settlements in Russian Federation]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 1, pp. 100–108. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-100-108

References

- [1] *Agroklimaticheskiy spravochnik po Arkhangel'skoy oblasti* [Agro-climatic guide to the Arkhangelsk region]: Leningrad: Gidrometizdat, 1961, 220 p.
- [2] Goryaev A.A., Petukhov S.V., Balantseva N.B. *Energoobespechenie v Arkticheskoy zone Arkhangel'skoy oblasti i Nenetskogo avtonomnogo okruga (NAO)* [Power supply in the Arctic zone of the Arkhangelsk region and the Nenets Autonomous Okrug (NAO)]. I Rossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Prirodopol'zovanie v Arktike: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya» [I Russian scientific and practical conference «Environmental management in the Arctic: current state and development prospects»], Yakutsk, 22–25 September 2015. Yakutsk: NEFU, 2015, pp. 191–200.
- [3] Berezkin M.Yu., Sinyugin O.A. *Geografiya innovatsiy i vozobnovlyаемaya energetika mira* [Geography of Innovations and Renewable Energy of the World]. *Malaya energetika* [Small Energy], 2011, no. 1–2, pp. 3–5.
- [4] Shepvalova O.V. *Ispol'zovanie vozobnovlyаемых istochnikov energii v kompleksnykh sistemakh energoobespecheniya sel'skikh zdaniy* [The use of renewable energy sources in integrated energy supply systems for rural buildings]. *Polzunovskiy vestnik* [Polzunovsky Bulletin], 2011, no. 21, pp. 175–180.

- [5] Kol'nichenko G.I., Siroto A.V., Tarlakov Ya.V. *Issledovanie i obosnovanie ekspluatatsionnykh kharakteristik dizel'-generatora, rabotayushchego na dizel'nom toplive s biodobavkami* [Research and justification of the performance characteristics of a diesel generator operating on diesel fuel with bioadditives]. *Sbornik trudov III Mezhdunarodnoy konferentsii «Aktual'nye problemy energosberegayushchikh elektrotekhnologii» (APEET-2014)* [Proceedings of the III International Conference APEET-2014]. Ekaterinburg: URFU, 2014, pp. 230–232.
- [6] BP Statistical Review of World Energy, 2016. Available at: <http://www.bp.com/statisticalreview> (дата обращения 10.04.2020).
- [7] 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.
- [8] *Maloizvestnoe oborudovanie dlya proizvodstva elektroenergii* [Little-known equipment for the production of electricity], 2016. Available at: <http://nnhpe.spbstu.ru/maloizvestnoe-oborudovanie-dlya-proizvodstva-elektroenergii/> (accessed 15.06.2019).
- [9] *Obzor elektroenergeticheskoy otrasli Rossii* [Overview of the Russian electric power industry], 2018 Available at: <https://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/EY-power-market-russia-2018/%24FILE/EY-power-market-russia-2018.pdf> (accessed 10.04.2020).
- [10] Tokarev G.G. *Gazogeneratornye avtomobili* [Gas generating cars]. Moscow: GNT Publishing house of engineering literature, 1955, 207 p.
- [11] *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. Available at: <http://nnhpe.spbstu.ru/wp-content/uploads/2015/02/Obzor-PTU-maloy-moshchnosti.pdf> (accessed 05.08.2019)
- [12] Elistratov V.V. *Vozobnovlyаемая энергетика* [Renewable energy]. St. Petersburg: Politekhnikeskiiy un-t [Polytechnic University], 2016, 442 p.
- [13] Vasil'ev I.A., Lyuminarskaya E.S., Selivanov K.V. *Gibridnaya energetika kak sposob elektrifikatsii geograficheski izolirovannykh potrebiteley* [Hybrid energy as a way of electrifying geographically isolated consumers]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology], 2018, no. 4–2 (330), pp. 154–161.
- [14] Vasil'ev I.A., Lyuminarskaya E.S., Selivanov K.V. *Avtonomnaya sistema energosnabzheniya s mikroprotsessornym upravleniem* [Autonomous power saving system with microprocessor control]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [Electronics and electrical equipment of transport] 2019, no. 2, pp. 21–26.
- [15] Selivanov K.V. *Analiz sposobov malogo raspredelenogo elektrosnabzheniya* [Analysis of small distributed power supply methods]. *International research journal*, 2017, no. 01 (55), part 4, pp. 107–110.
- [16] Knyazeva G.A. *Bioenergotekhnologii: novye napravleniya razvitiya regional'nogo lesnogo sektora* [Bioenergy technologies: new directions for the development of the regional forestry sector]. *Sotsial'no-ekonomicheskie, politicheskie i istoricheskie aspekty razvitiya severnykh i arkticheskikh regionov Rossii: Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii (s mezhdunarodnym uchastiem)* [Socio-economic, political and historical aspects of the development of the northern and Arctic regions of Russia: Materials of the All-Russian Scientific Conference (with international participation)]. Syktyvkar, October 17–18, 2018. Syktyvkar: Komi Republican Academy of Public Service and Management, 2018, pp. 20–25.
- [17] Langholtz M.H.; Stokes B.J.; Eaton L.M. 2016. 2016 Billion-ton report: Advancing domestic resources for a thriving bioeconomy, Volume 1: Economic availability of feedstock. U.S. Department of Energy. ORNL/TM-2016/160. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN. 411p. DOI: 10.2172/1271651.
- [18] Popel' O.S., Fortov V.E. *Energetika v sovremennoy mire* [Energy in the modern world]. Dolgoprudny: Intellect, 2011, 168 p.
- [19] 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.
- [20] 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.

Authors' information

Galkin Vladimir Pavlovich — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), vgalkin@mgul.ac.ru

Goryaev Arkadiy Alekseevich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, ark16111936@gmail.com

Balantseva Natal'ya Borisovna — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov

Kalinicheva Oksana Aleksandrovna — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov

Siroto Aleksandr Vladislavovich — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), siroto@mgul.ac.ru

Kalinina Alena Anatol'evna — Leading Engineer of the BMSTU (Mytishchi branch), kalinina@mgul.ac.ru

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

Usachev Maksim Sergeevich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), usachev@mgul.ac.ru

Received 26.05.2020.

Accepted for publication 16.11.2020.

О Д.И. МЕНДЕЛЕЕВЕ И ЕГО ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ. ПРОДОЛЖЕНИЕ

Ю.М. Евдокимов, И.Н. Герасимова, Т.Г. Грушева, А.Г. Степанов

Академия ГПС МЧС РФ, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4

evdokur@mail.ru

Приведено обсуждение статьи Г.Л. Олиференко, А.Н. Зарубиной, А.В. Устюгова, А.Н. Иванкина «К 150-летию Периодической системы химических элементов Д.И. Менделеева», опубликованной в Лесном вестнике / Forestry Bulletin, 2019, том 23, № 6, С. 117–123. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-6-117-123
Ключевые слова: периодический закон, система элементов и ее развитие

Ссылка для цитирования: Евдокимов Ю.М., Герасимова И.Н., Грушева Т.Г., Степанов А.Г. О Д.И. Менделееве и его Периодической системе. Продолжение // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 1. С. 109–114. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-109-114

В Лесном вестнике в конце 2019 г. появилась интересная публикация «К 150-летию Периодической системы химических элементов Д.И. Менделеева», посвященная истории создания периодического закона и Периодической системы химических элементов Д.И. Менделеева (далее Периодическая система) [1]. Ясно, что работа Менделеева «родилась» не на пустом месте — у него были предшественники и последователи, сделавшие свои попытки классификации химических элементов, о чем опубликовано немало материалов [1–18]. Интерес к Периодической системе не утихает до сих пор, возникают спорные вопросы о приоритете открытия периодического закона и составления таблицы. Серьезные признаки того, что с таблицей не все так просто стали появляться при заполнении нескольких последних ее ячеек, под угрозой оказался сам принцип периодичности [4]. Особо отчетливо это проявлялось по мере того как атомный номер открываемых элементов увеличивался, возрастало число протонов в их ядрах и становилось яснее, что некоторые из них уже не подчиняются закону периодичности. Более того, согласно Ю. Оганесяну [10], открывшему множество искусственных элементов, возможно, будет найден ответ на важнейший вопрос: где лежит граница нашего материального мира. Ведь пока не известно, будет ли соблюдаться для сверхтяжелых атомов принцип, согласно которому все элементы в столбце обладают одинаковыми свойствами. Периодическая система, однако, не во всех странах носит имя Д.И. Менделеева, за исключением одной из первых таблиц с именем Д.И. Менделеева, опубликованной в Вене в 1885 г.; распространены безымянные таблицы. Поскольку авторы работы, в частности [1] не могли охватить некоторые проблемы, указанные выше вследствие ограниченности объема статьи, мы попытались расширить границы представленных материалов [1], включились в дискуссию, дополнив материалы новыми данными.

Начнем с краткой истории становления Периодической системы, в которой участвовали известные марафонцы Иоганн Деберейнер (1780–1849), Александр Эмиль Шанкуртуа (1820–1886), Джон Ньюлендс (1837–1898), Станислао Канницаро

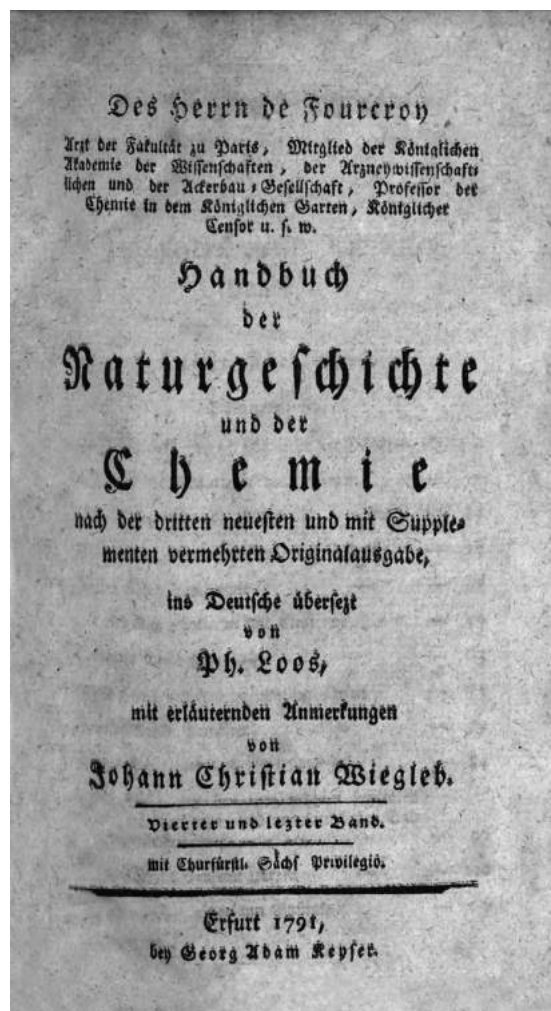


Рис. 1. Книга «Естественная история химии», 1791 г.
Fig. 1. The book «Natural history of chemistry», 1791

Tabelle der neuen französischen chemischen Nomenclatur;
 Vorgeschlagen durch die Herrn de Morveau, Berthollet, Berthollet und de Fourcroy im Jahr des Jahres 1787.

I. Unstetbare Substanzen.		II. Durch Mischungen in den Zustand des Gas verlegte Substanzen.		III. Mit festem Grundstoffen verbundene, und in Gasartigen Zustand verlegte Substanzen.		IV. Mit festem Grundstoffen verbundene, und in Gasartigen Zustand verlegte Substanzen.		V. Mit festem Grundstoffen verbundene Substanzen, und verschiedene andere Grundstoffe vereiniget.		VI. Verbundene, und nicht zum Zustand der Gase übergehende Substanzen.	
Fr. Namen.	Deutsche Namen.	Fr. Namen.	Deutsche Namen.	Fr. Namen.	Deutsche Namen.	Fr. Namen.	Deutsche Namen.	Fr. Namen.	Deutsche Namen.	Fr. Namen.	Deutsche Namen.
1 Laitime.	Stick.										
2 Oxygene.	Sauerstoff.										
3 Hydrogene.	Wasserstoff.										
4 Acide de R. acid nitrique.	Stickstoffsaure.										
5 Carbone.	Kohlenstoff.										
6 Soufre.	Schwefel.										
7 Phosphore.	Phosphor.										
8 Radical marin.	Meeressalz.										

Рис. 2. Классификация элементов и соединений, приведенная в книге «Естественная история химии»
 Fig. 2. Classification of elements and compounds from the book «Natural history of chemistry»

(1826–1910), Уильям Одлинг (1829–1921), Юлиус Мейер (1830–1895), Д.И. Менделеев (1834–1907), были и любители, которые занимались этой проблемой. Первая «Таблица простых тел» появилась в конце XVIII в. (в 1789 г. ее привел в своем учебнике химии француз Антуан Лавуазье, которого Д.И. Менделеев считал самым выдающимся химиком). Неспроста он поместил портрет Лавуазье на первую страницу своих «Основ химии» [5]. В 1815 г. англичанин Уильям Праут сформулировал гипотезу о том, что атомные веса всех элементов целочисленны и кратны атомному весу водорода (перворода). Эти первые попытки классификации химических элементов стимулировали новые поиски закономерностей их свойств, кратко описанные в работе [13]. Однако нам удалось отыскать немецкую книгу, изданную в 1791 г. (рис. 1), в которой, возможно, приведена одна из первых попыток создания Периодической системы (рис. 2) — «химической классификации» (на рис. 2 содержится только часть большой таблицы на четыре разворота).

Становление Периодической системы иногда было похоже на баталии. В 1862 г. А.Э. Шанкуртуа предложил винтовой график расположения элементов в порядке возрастания атомных весов. В следующем году англичанин Д. Ньюлендс опубликовал сообщение о соотношении между атомными весами элементов и их свойствами. Свой доклад о периодичности Д. Ньюлендс представил Лондонскому химическому обществу 1 марта 1866 г. Будучи не только химиком, но и музыкантом, он назвал найденную закономерность «законом октав», чем и загубил свой доклад (а ведь это было его находкой). Аудитория сочла «закон октав» более похожим на мистику, чем на науку. Несмотря на это Д. Ньюлендс от своей

идеи не отступил, опубликовал несколько статей и подал заявку на открытие Периодической системы в Немецкое химическое общество. Отклик пришел с другой стороны. Королевское общество Великобритании (возможно, руководствуясь угрызениями совести) присудило ему высшую награду в области химии — медаль Дэви, после награждения этой же медалью Д.И. Менделеева. В 1864 г. появились два варианта таблиц по систематике элементов Уильяма Одлинга и Юлиуса Лотара Мейера. Оба автора дорабатывали свои исследования. Лотар Мейер в 1868 г. опубликовал более полный вариант таблицы, а в декабре 1869 г. вышла новая работа Л. Мейера с приведением таблицы и пилообразного графика зависимости атомного объема элемента от атомного веса. 06 марта того же года (1869) от имени Д.И. Менделеева, который был в отъезде, Н.А. Меншуткин сделал доклад о периодической системе элементов на заседании Русского химического общества и в том же году вышла первая статья Д.И. Менделеева «Соотношение свойств с атомным весом элементов». Все три таблицы (Одлинга, Менделеева и Мейера) имели несомненные сходства [13]. Поэтому можно понять, как трудно было Д.И. Менделееву отстаивать свой приоритет. Забегая вперед скажем, что это удалось сделать благодаря его смелому предсказанию свойств некоторых неоткрытых элементов, что впоследствии подтвердилось.

В течение шести лет после открытия периодического закона и создания Периодической системы Д.И. Менделеевым ученые-химики считали это пустыми умозаключениями [19]. И даже бывший учитель Р.В. Бунзен (1811–1896) писал в письмах к Д.И. Менделееву: «Да оставьте вы меня в покое с этими догадками! Такие правиль-

ности вы найдете и между числами биржевого листка!». И только открытие французом Лекоком де Буабодраном (1838–1912) нового вещества — галлия, придало некоторое ускорение признания Периодической системы Д.И. Менделеева, ибо он предсказал существование подобного элемента под названием «эка-алюминий» в 1871 г. Во многих странах до 1970-х годов Периодическая система носила имя Мейера. В справочной книге [6, стр. 739] указывается даже три имени — Ньюлендса, Мейера, Менделеева. Даже в конце 1970-х годов [8] (рис. 3) приводились таблицы с двумя авторами — Менделеевым и Мейером.

А многие таблицы IUPAC (Международного союза теоретической и прикладной химии) периодического закона до 2008 г. оставались безымянными.

Понять можно. Завидовали немецкие и другие ученые (Германия была передовой научной державой) Д.И. Менделееву из-за его разносторонних познаний, широты охвата десятков разделов науки, ведь он достиг успехов в открытии газовых законов (закон Клайперона — Менделеева), теории растворов, в области получения бездымного пороха, соединений спирта с водой (1865), по гидродинамике, геологии. Д.И. Менделеев написал практически первый российский учебник по химии на русском языке. В личной библиотеке Д.И. Менделеева были книги на английском, немецком и французском языках, которыми он владел в совершенстве. На русском языке серьезных книг по химии в то время не было [10] и «Основы химии» Д.И. Менделеева 1877 г. издания стали, по существу, первой книгой по химии на русском языке. Д.И. Менделеев более всего любил работать в библиотеке Британского музея в Лондоне, где была обширная подборка литературы по естественнонаучным дисциплинам.

Мировое научное сообщество Д.И. Менделеева хорошо знает. Его имя и достижения описаны во всех крупных (значимых) справочниках и энциклопедиях десятков стран. Покажем это на примере Японии. Д.И. Менделеев не раз ссылался на работы японских ученых, в частности на работы К. Икеды (K. Ikeda) и Д. Сакурай (J. Sakuray) [5]. А имя самого Д.И. Менделеева упоминается в первом фундаментальном труде Н. Корокуро (Nakasaro Korokuro) «A History of Modern Chemistry», опубликованном в г. Киото в 1927 г. [15], наряду с именами М.Г. Кучерова и Н.Д. Зелинского. Вклад Д.И. Менделеева в развитие химической науки довольно подробно отмечен в монографии 1963 г. «История открытий в области химии» (Kagaku — по Natsume Nakken). В последовавшей после этого «Истории химии» (1966) Д. Цудзуки на японском языке предпринял попытку представить историю химии в Японии в единстве с открытиями в

8.3 MENDELEEV'S AND MEYER'S PERIODIC TABLES 137

Row	Group I	Group II	Group III	Group IV	Group V	Group VI	Group VII	Group VIII
1	H = 1							
2	Li = 7	Be = 9.4	B = 11	C = 12	N = 14	O = 16	F = 19	
3	Ne = 23	Mg = 24	Al = 27.3	Si = 28	P = 31	S = 32	Cl = 35.5	
4	K = 39	Ca = 40	Sc = 44	Ti = 48	V = 51	Cr = 52	Mn = 55	Fe = 56, Co = 59, Ni = 59
5	Cu = 63	Zn = 65	Y = 88	Zr = 90	Nb = 94	Mo = 96	Tc = 100	Ru = 101, Rh = 104, Pd = 106
6	Rb = 85	Sr = 87	Yt = 88	Zr = 90	Nb = 94	Mo = 96	Tc = 100	Ru = 101, Rh = 104, Pd = 106
7	Ag = 108	Cd = 112	In = 113	Sn = 118	Sb = 122	Te = 126	I = 127	
8	Cs = 133	Ba = 137	Dy = 138	Ce = 140				
9								
10			Er = 178	La = 180	Ta = 182	W = 184		Os = 196, Ir = 197, Pt = 198
11	Au = 199	Hg = 200	Tl = 204	Pb = 207	Bi = 208			
12				Th = 231	U = 240			

Рис. 3. Периодическая таблица из работы [8]
Fig. 3. Periodic table from the work [8]

области химии в Европе и Америке. В указанной работе подробно освещаются исследования русских ученых А.М. Бутлерова, Д.И. Менделеева, В.Н. Ипатьева и М.С. Цвета [15].

Были в Японии и подражатели работ, начатых Д.И. Менделеевым. Так, английский профессор химии Р.У. Аткинсон, который с 1874 г. был приглашенным профессором Токийской высшей школы (впоследствии ставшей факультетом науки Токийского университета) вместе со своими японскими студентами провел исследования «японской водки сакэ» (точнее ее следует отнести к вину) и опубликовал в 1881 г. соответствующую монографию по этой проблеме [16]. Д.И. Менделеев выполнил работу по теме докторской диссертации «О соединении спирта с водою», которая была опубликована в 1865 г. в Санкт-Петербурге (о водке там речи не было).

Интерес к работам Д.И. Менделеева в Японии связан отчасти и с тем, что в январе 1893 г. в Японии у него родилась внучка Офудзи от Така Хидесимы из г. Нагасаки (рис. 4). История эта связана с приятным (для мужчин) обычаем, бытовавшим в то время в Японии, по которому первая женщина — японка, встретившаяся матросу, сошедшему на берег с корабля, становилась его женой на время его пребывания в Японии.



Рис. 4. Така Хидэсима (Хидэсима) и ее дочь Офудзи

Fig. 4. Taka Hideshima and her daughter Ofuji

Так и сложилась судьба Таки из Нагасаки, встретившейся с русским офицером Владимиром Дмитриевичем Менделеевым (сыном Д.И. Менделеева), который служил на крейсере «Память Азова», волею случая пришедшего в г. Нагасаки. От этой встречи и родилась дочь. Но корабли долго не стоят в портах. Владимир вернулся в Санкт-Петербург, через 2 года женился там, забыв и о Таки, и о дочери. А она его долго помнила и каждое письмо (на русском) заканчивала словами «твоя верная Така». Переписываться с ней пришлось уже Д.И. Менделееву, которому внучка понравилась и в течение долгого времени он помогал матери и внучке деньгами, о чем сохранилось много материалов в архиве Д.И. Менделеева в СПбГУ и музее-квартире Д.И. Менделеева.

Что касается развития Периодической системы и периодического закона, то оно не прекращалось со дня их открытия. Если физики синтезируют новые элементы, то место им найдется только в следующем не существующем пока периоде. Он начнется с элемента 119. А с открытием 121 элемента начнется новый блок с элементами, имеющими неизвестные ранее g -орбитали, что приведет к увеличению периода таблицы [4]. Возникает вопрос: есть ли у Периодической системы Д.И. Менделеева конец? Ученые ограничивают этот предел таблицы числами 137 или 172–173. Вопрос о роли релятивистских эффектов более важен для химии как области науки.

Если периодический закон перестает работать, то химия как бы станет частью физики, в противном же случае она сохранит свою самостоятельность. По крайней мере, Дмитрий Иванович еще долгое время может «спать» спокойно, ибо пока ученые [3, 10] с «островом Стабильности» до конца не разобрались (химики знают, о чем идет речь). Считаем, что триумфом признания работ Менделеева в мире по Периодической системе и периодическому закону было проведение XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии (9–13 сентября 2019 г., г. Санкт-Петербург), посвященного 150-летию Периодической системы химических элементов Д.И. Менделеева. Открытие неизвестного прежде «черного азота» немецкими учеными [20] уже после окончания Менделеевского съезда разрешило парадокс Периодической системы Д.И. Менделеева об особенностях азота. Открытие нового аллотропа азота со структурой, напоминающей графен, показало, что азот не является исключительным элементом, а следует тому же правилу, что и углерод, и кислород. Это лишний раз показало прозорливость взглядов Д.И. Менделеева при открытии Периодической системы и составлении таблицы. Остальное все подробно и прекрасно изложено в работе [1].

Список литературы

- [1] Олиференко Г.Л., Зарубина А.Н., Устюгов А.В., Иванкин А.Н. К 150-летию Периодической системы химических элементов Д.И. Менделеева // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2019, том 23, № 6, С. 117–123. DOI: 10/18698/2542-1468-2019-6-117-123
- [2] Трифионов Д. Периодическая законность в поисках границ // НГ-наука (приложение к Независимой газете), 10 мая 2010 года, С. 14.
- [3] Фишман Р. Остров сокровищ // Популярная механика, 2016. № 11. С. 53–57.
- [4] Скерри Э. Таблица Менделеева: век недолог? // В мире науки, 2014, № 07/08. С. 78–81.
- [5] Менделеев Д. Основы химии, 6-е изд. С.-Петербург: Типография В. Демакова, 1895. 780 с.
- [6] Спутник химика. Справочная книга CHEMIKER – KALENDER профессора Dr. Rudolf Biedermann. С.-Петербург: Издание Ф.В. Щепанского, 1899. 652 с.
- [7] Коттон Ф., Уилкинсон Дж. Современная неорганическая химия, ч. 1. В 3 ч. М.: Мир, 1969. 226 с.
- [8] Ouelette Robert J. Understanding Chemistry. New York, Hagerstown, San Francisco, London: Harper & Row, Publisher, 1976, 64 p.
- [9] Рабинович Е., Тило Э. Периодическая система элементов. История и теория. М.; Л.: Государственное технико-теоретическое издательство, 1933. 409 с.
- [10] Чумаков В. Ядро пленительного счастья (беседа с академиком РАН Оганесяном Ю.Ц.) // В мире науки, 2019, № 12. С. 15–23.
- [11] Бучаченко А.Л. Религия молекул // Химия и жизнь – XXI век, 2012, № 1. С. 16–19.
- [12] Ritter S.K. The chemical bond // C&EN, 2007, January 29, p. 37–39.

- [13] Евдокимов Ю. К истории периодического закона // Наука и жизнь, 2009. № 5. С. 12–15.
- [14] Флеров Г.Н., Ильинов А.С. На пути к сверхэлементам. М.: Педагогика, 1977. 112 с.
- [15] Гельман З.Е. История химии в Японии. М.: МГУЛ, 2003. 42 с.
- [16] Atkinson R.W. The Chemistry of Sake-Brewing. Tokyo: Tokio Daigaku, 1881, 73 p.
- [17] Азимов А. Краткая история химии. Развитие идей и представлений в химии от алхимии до ядерной бомбы / Пер. с англ. З. Гельмана. СПб.: Амфора, 2002. 268 с.
- [18] Евдокимов Ю. Таким он был // НГ-Наука (приложение к Независимой газете), 1994. 18 января. С. 6.
- [19] Плотников В.К., Салфетников А.А., Косовский Г.Ю., Глазко В.И. К 150-летию открытия ДНК // Вестник РАЕН, 2020, № 1. С. 74–85.
- [20] Laniel D., Winkler B., Fedotenko T., Pakhomova A., Chariton S., Milman V., Prakupenka V., Dubrovinsky L., Dubrovinskaia N. High-pressure polymeric nitrogen allotrope with the black phosphorus structure // Physical Review Letters, 2020, v. 124, iss. 21, p. 216001.

Сведения об авторах

Евдокимов Юрий Михайлович — канд. хим. наук, профессор кафедры процессов горения Академии ГПС МЧС РФ, evdokur@mail.ru

Герасимова Ирина Николаевна — ст. преподаватель кафедры процессов горения Академии ГПС МЧС РФ, meegera@mail.ru

Грушева Татьяна Геннадиевна — ст. преподаватель кафедры процессов горения Академии ГПС МЧС РФ, grusheva.agps@yandex.ru

Степанов Анатолий Георгиевич — Академия ГПС МЧС РФ, agstepanow@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.08.2020.

Принята к публикации 13.10.2020.

D.I. MENDELEEV AND PERIODIC SYSTEM. CONTINUED

Yu.M. Evdokimov, I.N. Gerasimova, T.G. Grusheva, A.G. Stepanov

State Fire Academy of EMERCOM of Russia, Moscow, 4, Boris Galushkina, st., 129366, Moscow, Russia

evdokur@mail.ru

There has been presented a discussion of the article by G.L. Oliferenko, A.N. Zarubina, A.V. Ustyugova, A.N. Ivankin «To the 150th anniversary of the Periodic Table of Chemical Elements by D.I. Mendeleev», published in Forestry Bulletin, 2019, volume 23, No. 6, pp. 117-123. DOI: 10.18698 / 2542-1468-2019-6-117-123

Keywords: periodic law, system of elements of Mendeleev

Suggested citation: Evdokimov Yu.M., Gerasimova I.N., Grusheva T.G. Stepanov A.G. *O D.I. Mendeleev i ego Periodicheskoy sisteme. Prodolzhenie* [D.I. Mendeleev and Periodic system. Continued]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2021, vol. 25, no. 1, pp. 109–114. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-109-114

References

- [1] Oliferenko G.L., Zarubina A.N., Ustyugov A.V., Ivankin A.N. *K 150-letiyu periodicheskoy sistemy khimicheskikh elementov D.I. Mendeleeva* [To the 150th anniversary of the periodic system of chemical elements D.I. Mendeleev] Forestry Bulletin, 2019, volume 23, no. 6, pp. 117-123. DOI: 10/18698 / 2542-1468-2019-6-117-123
- [2] Trifonov D. *Periodicheskaya zakonnost' v poiskakh granits* [Periodic legality in search of borders]. NG-nauka (prilozhenie k Nezavisimoy gazete) [NG-science (supplement to Nezavisimaya gazeta)], May 10, 2010, p. 14.
- [3] Fishman R. *Ostrov sokrovishch* [Treasure Island]. Populyarnaya mekhanika [Popular Mechanics], 2016, no. 11, pp. 53–57.
- [4] Skerri E. *Tablitsa Mendeleeva: vek nedolog?* [Periodic Table: A Century Is Short?]. V mire nauki [In the world of science], 2014, no. 07/08, pp. 78–81.
- [5] Mendeleev D. *Osnovy khimii, 6-e izdanie* [Fundamentals of Chemistry, 6th edition]. St. Petersburg: V. Demakov's printing house, 1895, 780 p.
- [6] *Sputnik khimika. Spravochnaya kniga Chemiker – Kalender professora Dr. Rudolf Biedermann* [Companion of the chemist. Reference book Chemiker–Kalender by Professor Dr. Rudolf Biedermann]. St. Petersburg: Edition of F.V. Schepansky, 1899, 652 p.
- [7] Cotton F., Wilkinson J. *Sovremennaya neorganicheskaya khimiya, ch. 1. V 3 ch.* [Modern inorganic chemistry, part 1. In 3 parts]. Moscow: Mir, 1969, 226 p.
- [8] Ouelette Robert J. *Understanding Chemistry*. New York, Hagerstown, San Francisco, London: Harper & Row, Publisher, 1976, 64 p.
- [9] Rabinovich E., Tilo E. *Periodicheskaya sistema elementov. Istoriya i teoriya* [Periodic system of elements. History and theory]. Moscow-Leningrad: State technical-theoretical publishing house, 1933, 409 p.
- [10] Chumakov V. *Yadro plenitel'nogo schast'ya (beseda s akademikom RAN Oganesyonom Yu.Ts.)* [The core of captivating happiness (conversation with Academician of the Russian Academy of Sciences Oganesyanyan Yu. Ts.)]. V mire nauki [In the world of science], 2019, no. 12, pp. 15–23.

- [11] Buchachenko A.L. *Religiya molekul* [Religion of molecules]. *Khimiya i zhizn' – KhKh1 vek* [Chemistry and Life – XXI century], 2012, no. 1, pp. 16–19.
- [12] Ritter S.K. The chemical bond. *C&EN*, 2007, January 29, p. 37–39.
- [13] Evdokimov Yu. *K istorii periodicheskogo zakona* [On the history of the periodic law]. *Nauka i zhizn'* [Science and Life], 2009, no. 5, pp. 12–15.
- [14] Flerov G.N., Il'inov A.S. *Na puti k sverkhelementam* [Towards superelements]. Moscow: Pedagogika, 1977, 112 p.
- [15] Gel'man Z.E. *Istoriya khimii v Yaponii* [History of Chemistry in Japan]. Moscow: MGUL, 2003, 42 p.
- [16] Atkinson R.W. *The Chemistry of Sake-Brewing*. Tokyo: Tokio Daigaku, 1881, 73 p.
- [17] Azimov A. *Kratkaya istoriya khimii. Razvitie idey i predstavleniy v khimii ot alkhimii do yadernoy bomby / Per. s angl. Z. Gel'mana* [A Brief History of Chemistry. Development of ideas and concepts in chemistry from alchemy to the nuclear bomb. Translated from English Z. Gelman]. Saint Petersburg: Amphora, 2002, 268 p.
- [18] Evdokimov Yu. *Takim on byl* [So he was]. *NG-Nauka (prilozhenie k Nezavisimoy gazete)* [NG-Science (supplement to *Nezavisimaya Gazeta*)], 1994, January 18, p. 6.
- [19] Plotnikov V.K., Salfetnikov A.A., Kosovskiy G.Yu., Glazko V.I. *K 150-letiyu otkrytiya DNK* [On the 150-th anniversary of the discovery of DNA]. *Vestnik RAEN* [Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences], 2020, no. 1, pp. 74–85.
- [20] Laniel D., Winkler B., Fedotenko T., Pakhomova A., Chariton S., Milman V., Prakapenka V., Dubrovinsky L., Dubrovinskaya N. High-pressure polymeric nitrogen allotrope with the black phosphorus structure. *Physical Review Letters*, 2020, v. 124, iss. 21, p. 216001.

Authors' information

Evdokimov Yuriy Mikhaylovich — Cand. Sci. (Chemistry), Professor of the Department of Process of fire, State Fire Academy of EMERCOM, Moscow, evdokur@mail.ru

Gerasimova Irina Nikolaevna — Senior Lecturer of the Department of Process of fire, State Fire Academy of EMERCOM, Moscow, meegera@mail.ru

Grusheva Tatiana Gennadievna — Senior Lecturer of the Department of Process of fire, State Fire Academy of EMERCOM, Moscow, grusheva.agps@yandex.ru

Stepanov Anatoliy Georgievich — Academy of EMERCOM, agstepanow@yandex.ru

Received 10.08.2020.

Accepted for publication 13.10.2020.

УДК 631.542.33

DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-115-122

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ МЕХАНИЗАЦИИ ДЛЯ УДАЛЕНИЯ НЕЖЕЛАТЕЛЬНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

А.А. Платонов

Ростовский государственный университет путей сообщения, 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2

raa7@rambler.ru

В статье выполнены анализ, систематизация и оценка востребованности применяемых для удаления нежелательной древесно-кустарниковой растительности с территорий линейных инфраструктурных объектов машин, механизмов и оборудования. Проанализированы существующие технологические процессы, формирующие исключительно механические способы удаления нежелательной древесно-кустарниковой растительности. Систематизированы применяемые на территории линейных инфраструктурных объектов технические средства механизации работ по элементам технологического процесса. Показано преимущественное применение организациями-исполнителями работ конкретного ряда технических средств с указанием их характеристик и основных определяющих критериев востребованности. Установлено практически полное отсутствие как малых средств механизации, позволяющих уменьшить долю ручного труда при осуществлении работ по удалению нежелательной растительности в труднодоступных местах очищаемых территорий, так и специализированных подборщиков-погрузчиков порубочных остатков. Предложено и сформулировано определение технического средства сгребания нежелательной растительности: «грабли лесные». Раскрыто, что в ряде нормативных документов присутствуют некорректные названия моторизованных кусторезов ручного типа, приведены соответствующие рекомендации производству. Результаты работы могут быть использованы производственными предприятиями, занимающимися содержанием и эксплуатацией линейных инфраструктурных объектов.

Ключевые слова: линейный инфраструктурный объект, нежелательная растительность, удаление, механизация, техническое средство, характеристика, востребованность

Ссылка для цитирования: Платонов А.А. Современное состояние технических средств механизации для удаления нежелательной растительности // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 1. С. 115–122. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-115-122

Список литературы

- [1] Регионы России. Основные социально-экономические показатели городов. М.: Росстат, 2018. 443 с.
- [2] Российский статистический ежегодник. М.: Росстат, 2018. 694 с.
- [3] Сайты Обществ системы «Транснефть». URL: <https://www.transneft.ru/subsidiaries-company/> (дата обращения 25.10.2019).
- [4] О «Газпроме». URL: <https://www.gazprom.ru/about/> (дата обращения 25.10.2019).
- [5] О компании ПАО «Россети». URL: <http://www.rosseti.ru/about/company/> (дата обращения 25.10.2019).
- [6] Сощенко А.Е. Развитие методов и технических средств обеспечения эксплуатационной надежности линейной части трубопроводного транспорта нефти: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук: 25.00.19. Уфа, 2005. 48 с.
- [7] Силаев Г.В. Машины и механизмы в лесном и лесопарковом хозяйстве: в 2 ч. Часть 2. М.: Юрайт, 2020. 229 с.
- [8] Крейнис З.Л., Селезнева Н.Е. Техническое обслуживание и ремонт железнодорожного пути. М.: УМЦ ЖДТ, 2019. 453 с.
- [9] Магистральный трубопроводный транспорт газа в терминах и определениях / под ред. Б.В. Будзуляк. М.: ИРЦ Газпром, 2007. 247 с.
- [10] Бензиномоторные пилы. Устройство и эксплуатация / под ред. И.В. Григорьева. СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2017. 206 с.
- [11] Григорьев И.В., Куницкая О.А., Рудов С.Е., Давтян А.Б. Технология и система машин для раз рубки трасс линейных объектов // Энергия: экономика, техника, экология, 2019. № 10. С. 62–68.
- [12] Застенский Л.С., Неволин Н.Н. Машины и механизмы лесного хозяйства и их эксплуатация. Вологда: Издательство КРТ, 2000. 395 с.
- [13] Мясичев Д.Г. Потенциал малой механизации в лесохозяйственных технологических процессах // ИВУЗ. Лесной журнал, 2018. № 1 (361). С. 70–79.
- [14] Технология и машины лесосечных работ / под ред. В.И. Пятакина. СПб: СПбГЛТУ, 2012. 362 с.
- [15] Ascard J. Comparison of flaming and infrared radiation techniques for thermal weed control // Weed Res, 1998, no. 38, pp. 69–76.
- [16] Coleman G.R.Y., Stead A., Rigger M.P., Xu Z., Brooker G.M., Sukkarieh S., Walsh M.J. Using energy requirements to compare the suitability of alternative methods for broadcast and site-specific weed control // Weed Technology, 2019, v. 33, iss. 4, pp. 633–650.
- [17] Gerasimov Y., Senko S., Karjalainen T. Prospects of Forest Road Infrastructure Development in Northwest Russia with Proven Nordic Solutions // Scandinavian Journal of Forest Research, 2013, v. 28, no. 8, pp. 758–774.
- [18] Rask A.M., Kristoffersen P. A review of non-chemical weed control on hard surfaces // Weed Res, 2007, no. 47, pp. 370–380.
- [19] Антипов Б.В., Маркелов С.Ю., Хайдаров М.Т. Мульчерные технологии в полосе отвода железных дорог. М.: Арсенал, 2013. 115 с.
- [20] Apattsev V., Aksenov V., Zavyalov A. Upgrading technological processes of operating the railway infrastructure facilities // MATEC Web of Conferences, 2018, p. 04010.
- [21] Григорьев И.В., Григорьева О.И., Чураков А.А. Эффективные технологии и системы машин для малообъемных заготовок древесины // Энергия: экономика, техника, экология, 2018. № 2. С. 61–66.

- [22] Ивашнев М.В. Научные основы совершенствования машин для удаления древесно-кустарниковой растительности при непрерывном движении базового трактора: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. Петрозаводск, 2019, 36 с.
- [23] Платонов А.А. Технологические процессы удаления нежелательной растительности различными средствами механизации // Resources and Technology, 2017. Т. 14. № 2. С. 33–48.
- [24] Лесная энциклопедия, в 2-х т. / под ред. Г.И. Воробьева. М.: Советская энциклопедия, 1985–1986. Т. 1. 563 с., т. 2. 631 с.
- [25] Малюков С.В., Панявина Е.А., Аксенов А.А. Анализ конструкций мульчеров и роторов // Лесотехнический журнал, 2019. Т. 9. № 1 (33). С. 159–167.
- [26] Мульчеры: что мы о них знаем? URL: <https://os1.ru/article/9568-tipy-i-marki-mulcherov-predstavlennyh-na-gossiyskom-rynke-mulchery-chto-my-o-nih-znaem> (дата обращения 22.04.2020).
- [27] Тикачев В.И. Машины для измельчения древесины // ЛесПромИнформ, 2010. № 2 (68). С. 92–104.
- [28] Жданов Ю.М., Юдин Р.В., Попиков В.П., Канишев Д.А. Совершенствование технологического оборудования агрегата для удаления порубочных остатков из лесной полосы при рубках ухода // Лесотехнический журнал, 2015. Т. 5. № 3 (19). С. 210–220.
- [29] Техника. Энциклопедия / под ред. Г.И. Белов, А.П. Горкин. М.: Росмен-Пресс, 2006. 488 с.
- [30] Мамонтов И.М. Экскаватор вытесняет ручной труд на вырубке кустарника // Гудок: Восточно-Сибирский путь (транспортная газета), 2018. № 171. С. 7.

Сведения об авторе

Платонов Алексей Александрович — канд. техн. наук, доцент Ростовского государственного университета путей сообщения, raa7@gambler.ru

Поступила в редакцию 22.06.2020.

Принята к публикации 01.09.2020.

MODERN STATE OF TECHNICAL MEANS TO REMOVE UNCONTROLLED VEGETATION

A.A. Platonov

Rostov State Transport University, 2, Square of the Rostov Rifle Regiment of the People's Militia, 344038, Rostov-on-Don, Russia

paa7@rambler.ru

The article analyzes, systematizes and evaluates the demand for machines, mechanisms and equipment used to remove uncontrolled tree and shrub vegetation from the territories of linear infrastructural objects. The existing technological processes that form exclusively mechanical methods of removing unwanted tree and shrub vegetation are analyzed. The technical means of mechanization of work on the elements of the technological process used on the territory of linear infrastructure facilities are systematized. The predominant use of a specific number of technical means by implementing organizations is shown, indicating their characteristics and the main defining criteria of demand. It has been established that there is almost complete absence of both small means of mechanization, allowing to reduce the share of manual labor when carrying out work to remove unwanted vegetation in hard-to-reach places of the cleaned areas, and specialized pick-up loaders of felling residues. The definition of a technical means of raking up unwanted vegetation is proposed and formulated as a «forest rake». It was revealed that in a number of regulatory documents there are incorrect names for motorized hand-type brush cutters, corresponding recommendations for production are given. The results of the work can be used by enterprises engaged in the maintenance and operation of linear infrastructure facilities.

Keywords: linear infrastructure object, unwanted vegetation, removal, mechanization, technical means, characteristics, demand

Suggested citation: Platonov A.A. *Sovremennoe sostoyanie tekhnicheskikh sredstv mekhanizatsii dlya udaleniya nezhelatel'noy rastitel'nosti* [Modern state of technical means to remove uncontrolled vegetation]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 1, pp. 115–122. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-115-122

Currently, in the Russian Federation and in the world, new (and previously built) linear infrastructure facilities (LIFs) continue to be built, which include roads and railways, communication and power lines, gas, oil and product pipelines, and other facilities, length which significantly exceeds their width. According to the data provided in various statistical and information directories, as well as on the official websites of the respective joint-stock companies [1–5] in Russia alone as of 01.01.2019 the total length of power lines amounted to 2,35 million. km; trunk pipelines of 69080 km (including main oil pipelines of 52840 km, oil trunk pipelines of 16240 km); gas pipelines of 172,6 thousand km (as well as 746,3 thousand km of gas distribution networks); double-pipe heating networks of 183,3 thousand km; public roads 1498,7644 thousand km; public railways 85,554 thousand km. According to the instructions given in a number of regulatory documents ([6–9] and others), in order to maintain the indicated infrastructure facilities in a normative state on the LIF territory, work should be organized with a certain frequency to remove growing unwanted tree and shrub vegetation (UTSV). According to the results of our studies for 2012–2019 a general tendency towards an increase in the volume of work to remove UTSV from the territory of the linear parts of various infrastructure objects was revealed, while we set the average annual volume of unwanted vegetation removal at 57363,3 hectares, corresponding to the total length of the average annual UTSV removal

strip along the linear parts of infrastructure objects at 29 019 linear km. The indicated volumes of work (as well as the conditions for their implementation, a detailed consideration of which is not included in the goals and objectives of this article) impose certain requirements on machines and equipment that allow mechanizing the technological process of removing unwanted vegetation on LIF. However, our information search revealed insufficient knowledge of the issue of using universal and special forestry machines, mechanisms and equipment on the territory of linear infrastructure facilities, the parameters of which must comply with existing technical regulations (standards and other regulatory documents), ensure the reduction of material, energy and labor costs and comply with international standards ecology.

The purpose of the research

The purpose of the research is to analyze, systematize and assess the demand for the removal of unwanted tree and shrubbery vegetation in the territories of linear infrastructure objects of machines, mechanisms and equipment.

The tasks of the research:

1. To systematize the technical means of mechanization of work used in the territories of linear infrastructure facilities according to the elements of the technological process.
2. To identify the main representatives of domestic and foreign manufacturers of the considered technical means.

3. Determine the most popular technical means of mechanization among the organizations performing the work.

Materials and methods

Questions of mechanization of removal of unwanted tree and shrub vegetation at different times engaged both domestic [10–14] and foreign [15–18] scientists, however most researchers focused either on the combined method of removing UTSV from the LIF territory (providing for mechanized and subsequent chemical exposure to unwanted vegetation) [19, 20] or high-performance processes involving the removal of a significant amount of unwanted wood (including large stem diameter) [21, 22]. To achieve the above stated goal of the study, we examined existing technological processes (TP) that form exclusively mechanical methods for removing unwanted tree and shrub vegetation (by which we mean shrubs, light forests, undergrowths and overgrowth) from the territories of linear infrastructure facilities.

Our analysis of the existing technological processes for removing UTSV from the LIF territory (a detailed description of the results of which is not included in the purpose and objectives of this article) made it possible to establish that TP is implemented using universal and specialized machines, mechanisms, and equipment [23].

In general, the use of certain types and models of technical means of mechanization when removing vegetation is largely determined by the natural and geographical characteristics of the corresponding LIFs, climatic conditions, features of the vegetation

to be removed, and (to a large extent) financial component (namely, capital investments in the formation of appropriate machine system). Nevertheless, to achieve the purpose of the research we have identified the possibility of separating the technical means of mechanizing the work used to remove shrubs (light forests, undergrowth and overgrowth) by elements of the process into the following groups (fig. 1): Chainsaws, manual brush cutters, mounted mulchers, mounted brush cutters, forest rake, mounted pick-up loaders, shredders of chopping residues, pneumatic and / or tracked tractors, motor vehicles, multifunctional machines and self-propelled mulchers.

Results and discussion

An analysis of the machinery, mechanisms and equipment used to remove unwanted tree and shrubbery vegetation in the territories of linear infrastructure facilities showed the interest of domestic and foreign manufacturers of technical equipment in improving and developing this area, expressed in a large number of proposals, however we were among the implementing organizations certain preferences are revealed both by brands and by models of the corresponding technical means.

So, we found that with the manual (exclusively) and combined (manual and mechanized) method of influencing of the UTSV in the LIF territory chainsaws are used mainly of the trademarks Husqvarna, STIHL, Oleo-Mac, Makita, for example Husqvarna-254 (power 2,9 kW/3,9 hp), STIHL MS260 (2,6 kW/3,5 hp), Oleo-Mac 952 (2,5 kW/3,4 hp) [10], and manual brush cutters are mainly of the STIHL trademarks (e.g. FS 490 C-EM) and Husqvarna (e.g. 545F and 545FX). At the same time, we revealed a certain incorrectness in the names of manual brush cutters (fig. 2, a), appearing in a number of regulatory documents such as « petrol cutter», « petrol trimmer», « motorized cutter» etc., including «brush cutter» and «scissors brush cutter». Our information search [7, 14, 24], a detailed exposition of which is not included in the purposes and tasks of this article, which allows us to recommend the formation of technical tasks, technological cards, estimates and other regulatory documents on the removal of UTSV from the LIF territories, when assigning a manual method of influencing vegetation, adhere to the definition of «brush cutter» according to GOST R 51389–99 [7]. It should also be noted that in addition to the above technical means, we revealed the almost complete absence of other small mechanization means that would allow us to reduce the share of manual labor when working in hard-to-reach places (for example, near and inside metal poles of power lines, near pipe poles, etc.) cleared area LIF.

With the combined or mechanized (exclusively) method of influencing UTSV in the territory of the



Fig. 1. Visualization of groups of technical means of mechanization work removal of unwanted tree and shrub vegetation in the territory of linear infrastructure facilities



Fig. 2. Removal of unwanted trees and shrubs: *a* — in the security zone of the high-voltage line, Ryazan Region, April 2019; *b* — in the security zone of the high-voltage line, Moscow Region, June 2019; *c* — in the right of way of the road, Arkhangelsk Region, July 2016; *d* — forest rake EM 2200; *e* — forest rake GL-3000; *f* — in the security zone of the high-voltage line, Moscow region, February 2019; *g* — multifunction machine KGT-4RS with mulcher ORD; *h* — in the railway right of way, Republic of Buryatia, May 2020

LIF, attachments (on a tractor or a multifunctional machine) such as mulchers and brush cutters are used. As noted in [25], the main criteria for choosing a mulcher mounted on a tractor (fig. 2, *b*) are the characteristics of the shredded vegetation (for example, the prevailing breed composition, diameter, density, etc.) and compatibility with the base tractor. In accordance with [26], are currently represented on the Russian market mulcher manufacturers such as Italian Delta, Seppi M, Ferri, FAE Group, Orsi Group, Agrimaster, German AHWI Prinoth, Canadian Denis Cimaf, Spanish TMS Cancela, NIUBO, French Galotrax and others. The Russian companies that produce mulchers include Exmash, Chopper, TaigaMash, Industrial Meridian, TPI Impulse and others. At the same time, we found that when organizing work on the LIF, mounted mulchers mainly from Seppi M, FERRI, FAE Group,

Industrial Meridian and Agrimaster with a minimum base tractor engine power of 58...73 kW (80...100 hp), providing shredding of vegetation with a diameter of up to 250 mm. The mulchers of the middle class of power with the price from 500 thousand rubles to 1300 thousand rubles are most in demand among the organizations performing the work, while the total capital investments for the formation of the «tractor + mulcher» bundle can reach values from 1800 to 3700 thousand rubles and higher. Among the mulchers mounted on the end of the boom handle of multifunctional machines (fig. 2, *c*; selected according to such basic criteria as the characteristics of the crushed vegetation, compatibility with the base machine, and the mass of this machine), the most popular mulchers are mainly Seppi M, FERRI manufacturers and Denis Cimaf with the required mass of a multifunctional ma-

chine 15...30 tons, providing shredding of vegetation with a diameter of up to 400 mm and a price category in the range of 2...2,5 million rubles.

For mounted brush cutters, we have identified a preference for the purchase by the implementing organizations of the appropriate technical equipment from manufacturers from the Republic of Belarus (Amkodor, Blooming and Euromash), forming an acceptable (for these companies) price ratio of equipment (200...300 thousand rubles), its productivity (cutting vegetation with a diameter of up to 200 mm with a working tool width of 900...2000 mm) and general reliability (for example, BL-2, EM-1.3, K-78M brush-cutting mowers). In general, it should be noted the significant interest of the organizations involved in the removal of UTSV from LIF territories to Belarusian machines, mechanisms and equipment. So, for mechanized raking of chopped residues find application the forest rake EM 2200, GL-3000, Intatech, ZPI, the forestry harvesting equipment OUL-24 and the rake of forest branches SVL-2.1 of companies Euromash, Intatehgroup, Innovatek, MTZ and Techmash (fig. 2, *d, e*). At the same time, the executing organizations as the base vehicle, taking into account the main criteria for selecting a tractor (its traction class, engine power, ecological class, propulsion type — pneumatic or tracked, the possibility of mounting and driving additional equipment, the possibility of servicing and repairing compressed time periods, general reliability in operation, the reputation and reliability of the manufacturer, etc.) give much of the traditional preference to Belarusian-made equipment MTZ-HOLDING, and pneumatic-wheeled tractors with prices ranging from 1300 to 2400 thousand rubles are most in demand.

In our opinion, special attention should be paid to technical means raking the cut-off (cut down) UTSV during operations on the LIF territory. The traditional means for carrying out such work was the so-called «shrub rake», intended for raking in heaps of cut and uprooted shrubs, light forests and stumps with a diameter of up to 15 cm and aggregated with tractors of 6.0 thrust class. However, our studies have established that at present, other (more modern) technical means are often used to rake cut vegetation (including when working on the territory of linear infrastructure facilities), often referred to as «forest rake», although in some documents (for example, estimates for the performance of work) still often appear precisely «shrub rake». At the same time, we carried out an information search of numerous (encyclopedic, explanatory, forest, etc.) dictionaries, as well as technical literature (devoted to this topic), revealed the absence of a definition of what should be considered a technical tool with the name «Forest Rake». Based on the foregoing, we propose the following definition for introducing into the practice

of organizing work to remove unwanted vegetation: «Forest rake is a specialized mounted equipment designed to collect unshredded chopping residues in areas to be cleared of tree and shrub vegetation».

In the absence of opportunity loading and transporting chopping residues outside the territory of LIF by the technological process may include shredding (crushing into chips) of the cut-off / chopped UTSV (fig. 2, *f*). In general, we found that when performing work on the LIF territory, the implementing organizations, taking into account the main criteria for choosing a shredder for chopping residues [27], are the characteristics of the shredded vegetation (for example, the prevailing species composition, diameter, humidity, etc.), type of execution (stationary or mobile), power and speed of work, type of drive, compatibility with the base vehicle, etc., chopping residues are used mainly by manufacturers of Euromash, Mozyrmash, Rubmaster, Teknamotor and Farni Forest (for example, EM-160, MDR-0.8, Farni CH260 DF, BELARUS MPH-1, etc.), while shredders at the price of 200...300 thousand rubles, with the greatest demand among executing organizations use shredders at a price of 200...300 thousand rubles, providing processing of vegetation with a diameter of up to 260 mm with a chip output of 5...40 m³/hour.

If the technological process provides for the shipping of chopping residues, then this technological operation in the vast majority of cases is carried out by dump trucks (with the extremely rare use of specialized cars for transporting wood chips) of various (European, Asian, Russian) manufacturers, while we revealed the absence of any special preferences for brands (models) of the above vehicles. However, the greatest demand among organizations performing the work in question, dump trucks are used at prices from 3800 to 4800 thousand rubles, at the same time in the specified price category fall for example dump trucks such as KAMAZ 65115-50, URAL NEXT 6×4, MAZ-551626-580-050, FAW CA3250 6×4, etc. It should also be noted that we have established an almost complete absence of proposals from manufacturers of specialized pick-up loaders of chopping residues, as a result of which cut-off (cut down) UTSV is often carried out manually [28].

In addition to the above vehicles, when removing UTSV from the LIF territory, multifunctional machines and self-propelled mulchers are used. Multifunctional machines traditionally perceived in Russia as an «excavator» due to the presence of a number of design features that are actually similar to the signs of «... a self-propelled digging ground and loading machine designed to develop rocks and soils» [29], are used to remove unwanted vegetation on the root by grinding with a mulcher mounted on the end of the boom handle of the specified machine. We have identified the predominant use in the LIF

of multifunctional machines with an engine power of 108 ... 184 kW (147...246 hp) and a mass of 20...32 tons produced in Japan or South Korea (for example, Doosan DX 225, Komatsu PC200), the price of which varies between 5...7 million rubles. With this in mind, it is precisely with large capital investments in the formation of the «mulcher» + «multifunctional machine» bundle (the price of which, taking into account the mulcher, reaches 7...10 million rubles and above) and, in our opinion, a certain «unpopularity» of such technical means when removing UTSV from territories of linear infrastructure facilities. However, it should be noted that some large companies, acquiring such equipment, successfully operate it when removing unwanted vegetation from the LIF territory. As a positive example, we can note the experience of Russian Railways in operating (since 2011) multifunctional machines KGT-4RS on a combined (road and rail) course manufactured by Geismar (France) with the ORD mulcher (fig. 2, g), at the same time the introduction of one machine allows cleaning the railroad right of way «... to replace a whole crew of railwaymen with three or four chainsaws in the absence of the need to clean chopping residues» [30].

In terms of the use of self-propelled mulchers in LIF territories (fig. 2, h), we found that enterprises performing work that take into account the main criteria for their selection (characteristics of the shredded vegetation: prevailing species composition, diameter, density of growth; engine power and type of selection; ecological class; economy; the possibility of servicing and repair; general reliability in operation, the reputation and reliability of the manufacturer, etc.), there are no special preferences for brands (models). Nevertheless, it can be noted that when working on the LIF territory find limited use self-propelled mulchers TM-250 (Russia), PRIME TECH PT175 and PT300 (Italy), AHWI RT-400 (Germany), with an engine power of 127...294 kW (173...400 h.p.), providing cutting of vegetation with a diameter of up to 600 mm, while the specified restriction is associated, in our opinion, with such a nearly fundamental criterion for choosing a self-propelled mulcher as its price (11...14 million rubles, for some models reaching 25...30 million rubles).

Conclusions

1. We found that there was an almost complete absence of both small mechanization means to reduce the proportion of manual labor when removing unwanted vegetation in hard-to-reach areas of the LIF cleared area, and specialized pick-up loaders of chopping residues.

2. The main domestic and foreign manufacturers of technical means of mechanizing the removal of UTSV from the LIF territory, represented on the Russian market, were identified, at the same time, the

primary use by the organizations-executors of works of a number of technical means is shown, indicating their characteristics and the main determining criteria for demand.

3. It is established that the main reason for the unpopularity of use in the territories of linear infrastructure facilities the «mulcher» + «multifunctional machine» bundles are large (compared to the «tractor + mulcher» bundle: 3...8 million rubles and more) capital investments in the formation of the machine system.

4. To introduce the practice of organizing the removal of UTSV proposed and formulated definition such technical means of raking undesirable vegetation as the «Forest rake».

5. It is disclosed that in a number of regulatory documents on the organization of the removal of UTSV from the LIF territory there are incorrect names for motorized hand-type brush cutters. It is recommended to executing and contracting organizations when drafting technical tasks, work design projects, technological cards, estimates and other regulatory documents on the removal of UTSV from LIF territories, when defining a manual method for influencing vegetation, adhere to the definition of «brush cutter» according to GOST R 51389–99.

References

- [1] *Regiony Rossii. Osnovnyye sotsial'no-ekonomicheskiye pokazateli gorodov* [Regions of Russia. The main socio-economic indicators of cities]. Moscow: Rosstat, 2018, 443 p.
- [2] *Rossiyskiy statisticheskiy yezhegodnik* [Russian Statistical Yearbook]. Moscow: Rosstat, 2018, 694 p.
- [3] *Sayty Obshchestv sistem «Transneft'»* [Sites of the Companies of the Transneft system]. Available at: <https://www.transneft.ru/subsidiaries-company/> (accessed 25.10.2019).
- [4] *O «Gazprom»* [About Gazprom]. Available at: <https://www.gazprom.ru/about/> (accessed 25.10.2019).
- [5] *O kompanii PAO «Rosseti»* [About the company PJSC Rosseti]. Available at: <http://www.rosseti.ru/about/company/> (accessed 25.10.2019).
- [6] Soshchenko A.E. *Razvitie metodov i tekhnicheskikh sredstv obespecheniya ekspluatatsionnoy nadezhnosti lineynoy chasti truboprovodnogo transporta nefi* [Development of methods and technical means of ensuring the operational reliability of the linear part of the pipeline transport of oil]. Dis. ... Dr. Sci. (Tech.), 25.00.19. Ufa, 2005, 48 p.
- [7] Silaev G.V. *Mashiny i mekhanizmy v lesnom i lesoparkovom khozyaystve* [Machines and mechanisms in forestry and forest park economy]. In 2 p. Part 2. Moscow: Yurayt, 2020, 229 p.
- [8] Kreynis Z.L., Selezneva N.E. *Tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont zheleznodorozhnogo puti* [Maintenance and repair of the railway track]. Moscow: UMTs ZhDT, 2019, 453 p.
- [9] *Magistral'nyy truboprovodnyy transport gaza v terminakh i opredeleniyakh* [Main pipeline gas transportation in terms and definitions]. Ed. B.V. Budzulak. Moscow: IRTs Gazprom, 2007, 247 p.
- [10] *Benzinomotornyye pily. Ustroystvo i ekspluatatsiya. Uchebnik: pod red. I.V. Grigor'yeva* [Petrol motor saws.

- The device and operation. Ed. I.V. Grigoryev]. St. Petersburg: Publishing and Printing Association of Higher Education Institutions, 2017, 206 p.
- [11] Grigoriev I.V., Kunitskaya O.A., Rudov S.E., Davtyan A.B. *Tekhnologiya i sistema mashin dlya razrubki trass lineynykh ob"yektov* [Technology and system of machines for cutting lines of linear objects]. *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya* [Energy: economy, technology, ecology], 2019, no. 10, pp. 62–68.
- [12] Zastensky L.S., Nevolin N.N. *Mashiny i mekhanizmy lesnogo khozyaystva i ikh ekspluatatsiya* [Machines and mechanisms of forestry and their operation]. Vologda: KRT Publishing House, 2000, 395 p.
- [13] Myasishev D.G. *Potentsial maloy mekhanizatsii v lesokhozyaystvennykh tekhnologicheskikh protsessakh* [The potential of small-scale mechanization in forestry technological processes]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2018, no. 1 (361), pp. 70–79.
- [14] *Tekhnologiya i mashiny lesosechnykh rabot* [Technology and machines for logging operations]. Ed. V.I. Patyakin. St. Petersburg: SPbGLTU, 2012, 362 p.
- [15] Ascard J. Comparison of flaming and infrared radiation techniques for thermal weed control. *Weed Res*, 1998, no. 38, pp. 69–76.
- [16] Coleman G.R.Y., Stead A., Rigter M.P., Xu Z., Brooker G.M., Sukkarieh S., Walsh M.J. Using energy requirements to compare the suitability of alternative methods for broadcast and site-specific weed control. *Weed Technology*, 2019, v. 33, iss. 4, pp. 633–650.
- [17] Gerasimov Y., Senko S., Karjalainen T. Prospects of Forest Road Infrastructure Development in Northwest Russia with Proven Nordic Solutions. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2013, v. 28, no. 8, pp. 758–774.
- [18] Rask A.M., Kristoffersen P. A review of non-chemical weed control on hard surfaces. *Weed Res*, 2007, no. 47, pp. 370–380.
- [19] Antipov B.V., Markelov S.Yu., Khaidarov M.T. *Mul'chernyye tekhnologii v polose otvoda zheleznykh dorog* [Mulcher technologies in the railway right of way]. Moscow: Arsenal, 2013, 115 p.
- [20] Apattsev V., Aksenov V., Zavyalov A. Upgrading technological processes of operating the railway infrastructure facilities. *MATEC Web of Conferences*, 2018, p. 04010.
- [21] Grigoryev I.V., Grigoryeva O.I., Churakov A.A. *Effektivnyye tekhnologii i sistemy mashin dlya maloob'yomnykh zagotovok drevesiny* [Effective technologies and machine systems for low-volume timber procurements]. *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya* [Energy: economy, technology, ecology], 2018, no. 2, pp. 61–66.
- [22] Ivashnev M.V. *Nauchnyye osnovy sovershenstvovaniya mashin dlya udaleniya drevesno-kustarnikovoy rastitel'nosti pri nepreryvnom dvizhenii bazovogo traktora* [Scientific basis for the improvement of machines for removing tree and shrubbery with continuous movement of the base tractor]. Diss. Dr. Sci. (Tech.) 05.21.01. Petrozavodsk, 2019, 36 p.
- [23] Platonov A.A. *Tekhnologicheskiye protsessy udaleniya nezhelatel'noy rastitel'nosti razlichnymi sredstvami mekhanizatsii* [Technological processes for removing unwanted vegetation by various means of mechanization]. *Resources and Technology*, 2017, v. 14, no. 2, pp. 33–48.
- [24] *Lesnaya entsiklopediya, v 2-kh t.* [Forest Encyclopedia: in 2 volumes]. Ed. G.I. Vorobyov. Moscow: Soviet Encyclopedia, 1985–1986, v. 1, 563 p., v. 2, 631 p.
- [25] Malyukov S.V., Panyavina E.A., Aksenov A.A. *Analiz konstruktivnykh mul'cherov i rotovatorov* [Analysis of the designs of mulchers and rotovators]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering Journal], 2019, v. 9, no. 1 (33), pp. 159–167.
- [26] *Mul'chery: chto my o nih znayem?* [Mulchers: what do we know about them?]. Available at: <https://os1.ru/article/9568-tipy-i-marki-mulcherov-predstavlenykh-narossiyskom-rynke-mulchery-chto-my-o-nih-znaem> (accessed 22.04.2020).
- [27] Tikachev V.I. *Mashiny dlya izmel'cheniya drevesiny* [Machines for chopping wood]. *LesPromInform* [LesPromInform], 2010, no. 2 (68), pp. 92–104.
- [28] Zhdanov Yu.M., Yudin R.V., Popikov V.P., Kanishchev D.A. *Sovershenstvovaniye tekhnologicheskogo oborudovaniya agregata dlya udaleniya porubochnykh ostatkov iz lesnoy polosy pri rubkakh ukhoda* [Improving the technological equipment of the unit for removing chopped residues from the forest strip during thinning]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering Journal], 2015, v. 5, no. 3(19), pp. 210–220.
- [29] *Tekhnika. Entsiklopediya: pod red. G.I. Belov, A.P. Gorkin* [Technique. Encyclopedia]. Ed. G.I. Belov, A.P. Gorkin. Moscow: Rosmen-Press, 2006, 488 p.
- [30] Mamontov I.M. *Ekskavator vytesnyayet ruchnoy trud na vyrubke kustarnika* [An excavator displaces manual labor on cutting down a shrub]. *Gudok: Vostochno-Sibirskiy put'* (transportnaya gazeta) [Hooter: East Siberian Route (transport newspaper)], 2018, no. 171, p. 7.

Author's information

Platonov Aleksey Aleksandrovich — Cand. Sci. (Tech.) Associate Professor of the Rostov State Transport University, pa7@rambler.ru

Received 22.06.2020.

Accepted for publication 01.09.2020.

МЕТОДИКА ВЫБОРА МАНИПУЛЯТОРА ХАРВЕСТЕРА

С.П. Карпачев, М.А. Быковский, А.В. Лаптев

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

karpachevs@mail.ru

Изложены теоретические и экспериментальные исследования по обоснованию выбора манипулятора для харвестера. Разработана математическая модель работы харвестера на основе учета природных и производственно-технологических факторов, а также характеристик базы машины и харвестерной головки. Обоснованы характеристики манипулятора, в частности, максимальный вылет и грузовой момент манипулятора при заданных параметрах базовой машины и выбранной харвестерной головки. Рекомендовано при выборе манипулятора исходить из того, что некоторая часть крупномерных деревьев может быть оставлена на лесосеке или свалена бензопилами. Установлено, что вылет стрелы манипулятора в пределах от 8 до 11 м мало влияет на объем и число заготовленных деревьев. Процент заготавливаемого объема древесины мало зависит от вылета стрелы манипулятора и остается в пределах не менее 90 %.

Ключевые слова: манипулятор, математическая модель, имитационное моделирование

Ссылка для цитирования: Карпачев С.П., Быковский М.А., Лаптев А.В. Методика выбора манипулятора харвестера // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 1. С. 123–129.
DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-123-129

Существенное влияние на выполнение основных операций технологического цикла харвестера, а значит, и на его производительность, оказывает его технологическое оборудование, в частности манипулятор, на долю которого приходится 70...80 % времени участия в рабочем цикле харвестера.

Манипулятор харвестера можно выбрать, если известна база машины и определена харвестерная головка. Характеристики харвестерной головки, которые влияют на выбор манипулятора, это прежде всего максимальная ширина раскрытия захватных рычагов, которая определяет максимальный диаметр обрабатываемого дерева и вес головки.

Цель работы

Цель работы — разработка методики выбора манипулятора по критерию достижения максимальной производительности харвестера на основе учета природных и производственно-технологических факторов, а также характеристик базы машины и харвестерной головки на примере природных условий Центрального федерального округа (ЦФО).

Для достижения указанной цели нами применялись методы имитационного моделирования с использованием математических моделей [1–8].

Объекты и методика исследований

Валка леса харвестером осуществляется со стоянок в пределах рабочей зоны. Размер рабочей зоны определяется максимальным $R_{\text{ман}}$ и минимальным $r_{\text{ман}}$ вылетом стрелы манипулятора (рис. 1).

Первоначально харвестер 2 находится на стоянке 0 и заготавливает деревья в пределах рабочей зоны площадки I. После обработки всех деревьев

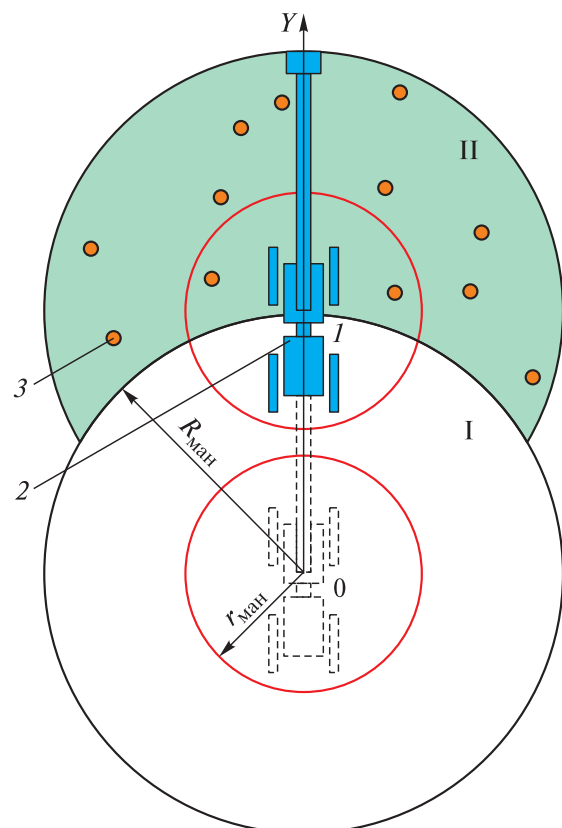


Рис. 1. Технологическая схема работы харвестера: 0, 1 — стоянка; 2 — харвестер; 3 — деревья; I, II — рабочие зоны
Fig. 1. Technological scheme of the harvester operation: 0, 1 — parking; 2 — harvester; 3 — trees; I, II — working areas

на площадке I оператор направляет харвестер 2 от стоянки 0 к стоянке 1 в рабочей зоне площадки II. Среднее расстояние перемещения харвестера от стоянки к стоянке равно длине вылета манипулятора. Обработка деревьев в пределах «мертвой»

зоны работы манипулятора может осуществляться с промежуточной стоянки.

Харвестер на рабочей стоянке устанавливается таким образом, чтобы харвестерную головку можно было навести на дерево без задевания других деревьев и обзор из кабины на место пропила был наилучшим. Работа на рабочей стоянке начинается с валки ближайших деревьев и заканчивается валкой наиболее удаленных. Оператор с помощью манипулятора осуществляет подведение головки к дереву, затем проводит захват и спиливает дерево. При этом манипулятор в момент падения дерева сталкивает и подтаскивает его к месту дальнейшей обработки. Направление сталкивания дерева выбирается с учетом места пакетирования сортиментов и предъявляемых требований к сохранности деревьев и подроста, оставляемых после рубки. Обрезка сучьев и раскряжевка осуществляются, как правило, на волоке перед харвестером, так чтобы обрезаемые сучья оказались на волоке, а отпиливаемые сортименты сбоку от волока.

Технологический процесс работы харвестера смоделирован с учетом природно-производственных факторов [9–25].

Основные природные факторы учтенные в модели:

- число деревьев в пределах рабочей зоны;
- диаметр ствола дерева в месте спиливания;
- масса дерева и объем хлыста.

Основными учитываемыми в модели производственными факторами были приняты максимальный $R_{\text{ман}}$ и минимальный $r_{\text{ман}}$ вылеты стрелы манипулятора, которые ограничивают возможную площадь рабочей зоны.

При валке деревьев были проверены следующие ограничительные условия по харвестерной головке и по манипулятору:

1) диаметр ствола дерева в месте спиливания должен быть меньше максимальной ширины раскрытия захватных рычагов харвестерной головки; если условие не выполняется, то дерево остается на лесосеке;

2) масса дерева создает грузовой момент меньше допустимого грузового момента манипулятора;

3) масса дерева создает опрокидывающий момент меньше удерживающего (стабилизирующего) момента харвестера.

Если условия 2 или 3 не выполняются, то харвестер будет съезжать с волока и располагаться по отношению к дереву на расстоянии минимального вылета стрелы манипулятора. В случае если при подъезде к дереву на минимальное расстояние ограничительные условия по моментам не выполняются, дерево остается на лесосеке.

Средние значения таксационных показателей лесов по ЦФО, которые использовались при моделировании, были приняты следующими:

Объем хлыста, м ³	0,41
Диаметр ствола на высоте 1,3 м, см.....	23,4
Высота дерева, м.....	20,2
Запас леса на 1 га, м ³	192
Число деревьев на 1 га, шт.	468

При моделировании древостоев использовались распределения количества деревьев и их объемы по диаметрам стволов на высоте 1,3 м и в месте спиливания. Диаметр ствола в месте спиливания определялся как случайное непрерывное число. В моделях при генерации диаметров стволов использовалось *beta*-распределение с диапазоном варьирования диаметров стволов, которые были установлены экспериментально.

Ограничительные условия, связанные с массой обрабатываемого дерева, представляют собой зависимости сочетания грузового момента используемого манипулятора и устойчивости харвестера от опрокидывания во время его работы [10].

Проверка по грузовому моменту используемого манипулятора (рис. 2) (ограничение, связанное с поломкой манипулятора от перегрузки) проводилась для каждого *i*-го дерева по условию

$$G_{\text{дери}} \leq \frac{1000M_{\text{брутто}}K}{R_{1i}} - G_{\text{хг}}, \quad (1)$$

где $M_{\text{брутто}}$ — грузовой момент манипулятора брутто, кН·м;

$K = 0,725$ — коэффициент перевода грузового момента брутто в грузовой момент нетто;

R_{1i} — расстояние вылета стрелы манипулятора до *i*-го дерева, м;

$G_{\text{хг}}$ — вес харвестерной головки, Н;

$G_{\text{дери}}$ — вес *i*-го дерева, Н;

$G_{\text{дери}} = m_{\text{дери}} \cdot g$;

$m_{\text{дери}}$ — масса *i*-го дерева, кг;

g — ускорение свободного падения, м/с².

Проверка устойчивости харвестера от опрокидывания во время выполнения валки для каждого дерева проводилась по допустимым опрокидывающим моментам [11].

Допустимый опрокидывающий момент по условию продольной устойчивости должен быть меньше или равен стабилизирующему моменту (относительно оси *Y*)

$$M_{\text{стаб}_y i} \geq M_{\text{опр}_y i} \quad (2)$$

Допустимый опрокидывающий момент по условию поперечной устойчивости должен быть меньше или равен стабилизирующему моменту (относительно оси *X*)

$$M_{\text{стаб}_x i} \geq M_{\text{опр}_x i} \quad (3)$$

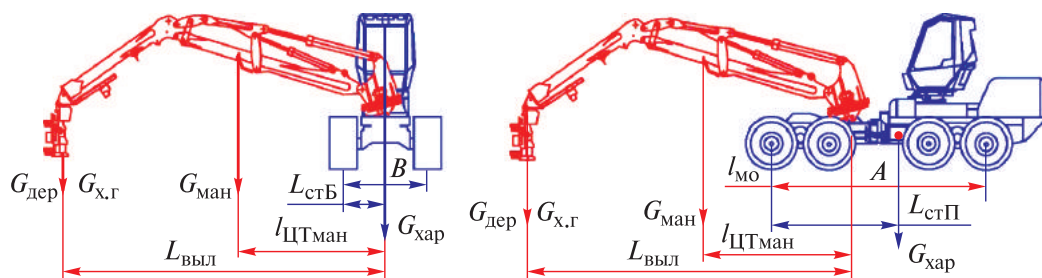


Рис. 2. Расчетная схема сил, действующих на многооперационную машину
 Fig. 2. Design scheme of forces acting on a multioperational machine

Расчетные формулы (обозначения соответствуют рис. 2)
Calculation formulas (notations correspond to Fig. 2)

Наименование	Расчетные формулы	
	Относительно оси Y	Относительно оси X
Стабилизирующий момент	$M_{\text{стаб_y}} = \frac{G_x L_{\text{стП}}}{1,4}$	$M_{\text{стаб_x}} = \frac{G_x L_{\text{стБ}}}{1,4}$
Грузовой момент от дерева	$M_{\text{гр_y}} = G_{\text{дер}}(R_1 \cos \alpha - l_{\text{мо}})$	$M_{\text{гр_x}} = G_{\text{дер}}(R_1 \sin \alpha - L_{\text{стБ}})$
Момент манипулятора	$M_{\text{ман_y}} = G_{\text{ман}}(0,42R_1 \cos \alpha - l_{\text{мо}})$	$M_{\text{ман_x}} = G_{\text{ман}}(0,42R_1 \sin \alpha - L_{\text{стБ}})$
Момент харвестерной головки	$M_{\text{ХГ_y}} = G_{\text{ХГ}}(R_1 \cos \alpha - l_{\text{мо}})$	$M_{\text{ХГ_x}} = G_{\text{ХГ}}(R_1 \sin \alpha - L_{\text{стБ}})$
Опрокидывающий момент	$M_{\text{опр_y}} = M_{\text{гр_y}} + M_{\text{ман_y}} + M_{\text{ХГ_y}}$	$M_{\text{опр_x}} = M_{\text{гр_x}} + M_{\text{ман_x}} + M_{\text{ХГ_x}}$
Угол поворота манипулятора	α	

Формулы для расчета моментов приведены в таблице.

В случае невыполнения условий (1) или (2), или (3) харвестер подъезжал к дереву на минимальное расстояние, которое соответствовало минимальному вылету стрелы манипулятора равному 4 м. Для этого моделировался соответствующий маневр харвестера. В случае невыполнения условий (1) или (2), или (3) и при минимальном вылете манипулятора, дерево считалось не сваленным и учитывалось как оставленное на лесосеке.

Производительность харвестера в модели определялась как объем всех сваленных и переработанных на сортименты деревьев за 1 час

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n T_{\text{ци}} = 3600 \text{ с;} \\ P_{\text{час}} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{n_c} V_{\text{сijk}} \end{array} \right\}, \quad (4)$$

- где $T_{\text{ци}}$ — время i -го цикла обработки одного дерева на j -й стоянке, с;
- $V_{\text{сijk}}$ — объем k -го сортимента во время i -го цикла обработки дерева на j -й стоянке, м^3 ;
- N — число стоянок харвестера за 1 час;
- n — число деревьев на j -й стоянке, которые могут быть спилены и обработаны харвестером, с учетом ограничений (1) — (3);
- n_c — число сортиментов на j -й стоянке при обработке i -го дерева.

Время цикла $T_{\text{ци}}$ включает в себя время на наведение и доставку харвестерной головки к дереву, зажим рычагов, валку дерева (спиливание, сталкивание с пня и перемещение), обрезку сучьев и раскряжевку на сортименты. Время цикла обработки каждого дерева в модели задавалось как непрерывное случайное число. Распределение времени цикла принято по экспоненциальному закону.

Математическая модель была реализована в виде компьютерной программы. Эта программа позволяет вводить любую базу машины и любые характеристики харвестерной головки, и исследовать работу манипулятора с разными максимальными вылетами стрелы и грузовыми моментами.

Результаты и обсуждение

В настоящей статье представлены результаты исследований влияния максимального вылета стрелы манипулятора (для линейки манипуляторов от 8 до 11 м) на выходные показатели работы харвестера с максимальной шириной раскрытия захватных рычагов харвестерной головки 750 мм.

В качестве базовой машины был выбран харвестер со следующими характеристиками (см. рис. 2):

- Длина опорного контура A , мм 5580
- Ширина опорного контура B , мм 2196
- Расстояние от центра тяжести харвестера до поперечной оси опрокидывания $L_{\text{стП}}$, мм 3380

Расстояние от центра тяжести харвестера до боковой оси опрокидывания $L_{стБ}$, мм	1098
Расстояние от оси вращения (крепления манипулятора) до поперечной оси опрокидывания $l_{мо}$, мм	208
Вес харвестера G_x , Н	159475,4
Вес харвестерной головки с ротатором $G_{хд}$, Н	13524
Вес манипулятора $G_{ман}$ изменяется в расчетах в зависимости от максимального вылета манипулятора.	

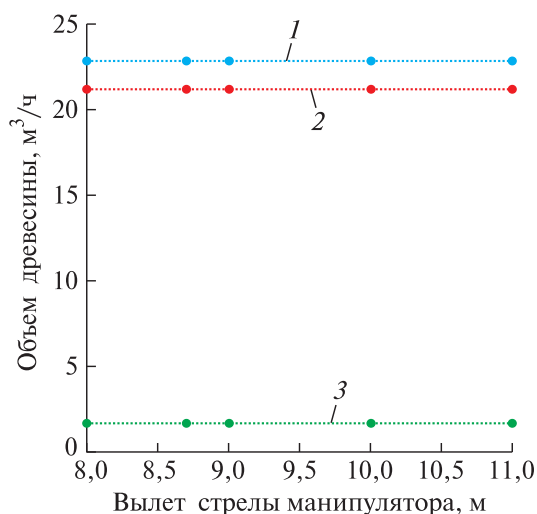


Рис. 3. Зависимость объема древесины от максимального вылета стрелы манипулятора: 1 — общий объем древесины; 2 — объем заготовленной древесины; 3 — объем оставленной древесины

Fig. 3. Dependence of the wood volume on the maximum of manipulator boom reach: 1 — total volume of wood; 2 — the volume of harvested wood; 3 — the volume of wood left

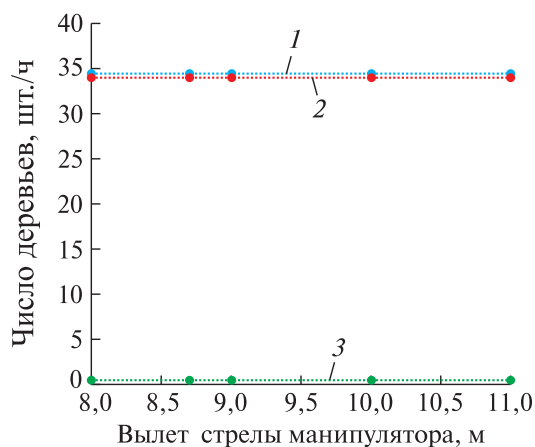


Рис. 4. Зависимость числа деревьев от максимального вылета стрелы манипулятора: 1 — общее число деревьев; 2 — число заготовленных деревьев; 3 — число оставленных деревьев

Fig. 4. Dependence of the trees number on the maximum manipulator boom reach: 1 — the total number of trees; 2 — the number of harvested trees; 3 — the number of trees left

Некоторые результаты исследований представлены в виде зависимостей (рис. 3, 4).

Из рис. 3 видно, что общий объем древесины с увеличением максимального вылета стрелы манипулятора растет. Этого и следовало ожидать, поскольку увеличивается площадь рабочей зоны. Отметим, что рост небольшой и особенно преимущества манипулятор с максимальным вылетом стрелы 11 м не дает, по сравнению с манипулятором 8 м. Так, например, общий объем охватываемой древесины манипулятором 8 м составляет 22,761 м³/ч, а манипулятора 11 м — 22,971 м³/ч, т. е. увеличение объема древесины составляет всего 1 %. По этому показателю влияние максимального вылета стрелы манипулятора не существенно.

Объем заготовленной древесины с увеличением максимального вылета стрелы манипулятора растет, а объем оставленных на лесосеке деревьев почти не изменяется (см. рис. 4). Так, например, для манипулятора 8 м объем заготовленной древесины равен 21,088 м³/ч, объем оставленной — 1,673 м³/ч. Для манипулятора с максимальным вылетом стрелы 11 м, соответствующие объемы будут равны 21,263 и 1,708 м³/ч. Таким образом, рост производительности при увеличении максимального вылета стрелы манипулятора с 8 до 11 м составил менее 0,8 %. По этому показателю влияние максимального вылета стрелы манипулятора не существенно.

Число заготовленных деревьев (см. рис. 4) также почти не изменяется. Так, например, число заготавливаемого объема древесины манипулятором 8 м составляет 33,806 шт./ч, а манипулятора 11 м — 34,152 шт./ч, т. е. рост составляет не более 1 %.

Число оставленных деревьев остается в пределах 0,4 шт./ч. Рост не превышает 2,5 %. По этому показателю влияние максимального вылета стрелы манипулятора не существенно.

Выводы

Результаты имитационных экспериментов позволили сделать следующие выводы:

1. С увеличением максимального вылета стрелы манипулятора растет объем заготавливаемой древесины, то есть производительность харвестера по объему заготовок, однако этот рост не существен и не превышает 0,8 %.

2. С увеличением влияния максимального вылета стрелы манипулятора растет количество заготавливаемых деревьев, то есть производительность харвестера по числу заготовленных деревьев, однако этот рост не существен и не превышает 1 %.

3. Процент заготавливаемого объема древесины почти не зависит от влияния максимального вылета стрелы манипулятора и остается в пределах не менее 90 %.

4. Процент заготавливаемых деревьев практически не зависит от влияния максимального вылета стрелы манипулятора и остается более 98 %.

Работа выполнена в МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал) при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения №075-11-2019-030 от 22 ноября 2019 г.

Список литературы

- [1] Шелгунов Ю.В. Машины и оборудование лесозаготовок, лесосплава и лесного хозяйства. М.: Лесная промышленность, 1982. 520 с.
- [2] Spinelli R., Hartsough B. A survey of Italian chipping operations // Biomass and Bioenergy, 2001, v. 21(6), pp. 433–444.
- [3] Ширнин Ю.А. Технологии и оборудование лесопромышленных производств. Ч. 1. Лесосечные работы. М.: МГУЛ, 2004. 445 с.
- [4] Eliasson L., von Hofsten H., Johannesson T., Spinelli R., Thierfelder T. Effects of sieve size on chipper productivity, fuel consumption and chip size distribution for open drum chippers // Croatian J. of Forest Engineering, 2015, v. 36(1), pp. 11–17.
- [5] Mihelic M., Spinelli R., Poje A. Production of Wood Chips from Logging Residue under Space-Constrained Conditions // Croatian J. of Forest Engineering, 2018, v. 39(2), pp. 223–232.
- [6] Виногоров Г.К. Лесосечные работы. М.: Лесная промышленность, 1981. 272 с.
- [7] Karpachev S.P., Zaprudnov V.I., Bykovskiy M.A., Karpacheva I.P. Simulation Studies on Line Intersect Sampling of Residues Left After Cut-to-Length Logging // Croatian J. of Forest Engineering, 2020, v. 41 (1), pp. 95–107. DOI: <https://doi.org/10.5552/crojfe.2020.531>
- [8] Салминен Э.О., Гуров С.В., Большаков Б.М. Размещение волоков на заболоченных участках // Лесная промышленность, 1988. № 3. С. 32–33.
- [9] Барановский В.А., Некрасов Р.М. Системы машин для лесозаготовок. М.: Лесная промышленность, 1977. 248 с.
- [10] Magagnotti N., Spinelli R. Good practice guidelines for biomass production studies; WG2 Operations research and measurement methodologies. Sesto Fiorentino, Italy: COST Action FP-0902 and CNR Ivalsa, 2012, 52 p.
- [11] Рыжков А.Е., Проказин Н.Е. Система добровольной лесной сертификации PEFC-FCR, оценка лесопользования, лесопользования и цепочки поставок лесопроизводства на соответствие международным требованиям. М.: PEFC-FCR, 1916. 254 с.
- [12] Spinelli R., Nati C., Magagnotti N. Recovering logging residue: experiences from the Italian Eastern Alps // Croatian J. of Forest Engineering, 2007, v. 28(1), pp. 1–9.
- [13] Григорьев И.В., Жукова А.И. Координатно-объемная методика трассирования при освоении лесосек трелевочной // ИВУЗ Лесной журнал, 2004. № 4. С. 40–44.
- [14] Gerasimov Y., Karjalainen T. Energy wood resources in Northwest Russia // Biomass and Bioenergy, 2011, no. 35, pp. 1655–1662.
- [15] Esteban B., Baquero G., Puig R., Riba J.R., Rius A. Is it environmentally advantageous to use vegetable oil directly as biofuel instead of converting it to biodiesel? // Biomass Bioenergy, 2011, no. 35, pp. 1317–1328. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.025> (дата обращения 01.02.2020).
- [16] Сюнев В.С. Сравнение технологий лесосечных работ в лесозаготовительных компаниях Республики Карелия. Йоенсуу: НИИ леса Финляндии METLA, 2008. 126 с.
- [17] Макаренко А.В., Быковский М.А., Лаптев А.В. Эффективность выполнения технологических операций при проведении выборочных рубок леса // Актуальные проблемы развития лесного комплекса. Материалы 13-й Междунар. науч.-техн. конф., 01–02 декабря 2015 г., Вологодский государственный университет. Вологда: ВГТУ, 2016. С. 32–37.
- [18] Григорьев И.В., Жукова А.И., Григорьева О.И., Иванов А.В. Средоадаптированные технологии разработки лесосек в условиях северо-западного региона Российской Федерации. СПб.: СПбГЛТА, 2008. 174 с.
- [19] Герц Э.Ф. Оценка технологии лесопользования на лесосечных работах. Екатеринбург: УГЛТУ, 2003. 120 с.
- [20] Макаренко А.В. Оптимизация размещения сети трелевочных волоков на лесосеке // Лесозаготовительное производство: проблемы и решения. Материалы Междунар. науч.-техн. конф., 26–28 апреля 2017 г. Минск, БГТУ. Минск: БГТУ, 2017. С. 233–237.
- [21] Галактионов О.Н. Технологический процесс лесозаготовок и ресурсы лесосечных отходов. Петрозаводск: ПетрГУ, 2007. 95 с.
- [22] Кузнецов В.И. Представляем фирму «Лестехком» – новое качество лесозаготовительной техники // Лесная промышленность, 2006. № 1. С. 12–14.
- [23] Пискунов М.А. Распределение проходов форвардера и построение оптимальных схем расположения трелевочных волоков на лесосеке // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер. Лес. Экология. Природопользование, 2017. № 2 (34). С. 37–48.
- [24] Григорьев И.В. Снижение отрицательного воздействия на почву колесных тракторов обоснованием режимов их движения и технологического оборудования. СПб.: СПбГЛТА, 2006. 236 с.
- [25] Дербин В.М., Дербин М.В. Технология работы харвестера при выборочных рубках // Лесотехнический журнал, 2016. № 2. С. 69–75. DOI: [10.12737/19956](https://doi.org/10.12737/19956)

Сведения об авторах

Карпачев Сергей Петрович — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), karpachevs@mail.ru

Быковский Максим Анатольевич — канд. техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), bykovskiy@mgul.ac.ru

Лаптев Александр Валентинович — ст. преподаватель МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), laptev@mgul.ac.ru

Поступила в редакцию 16.10.2020.

Принята к публикации 16.11.2020.

METHOD OF SELECTING A HARVESTER MANIPULATOR

S.P. Karpachev, M.A. Bykovskiy, A.V. Laptev

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

karpachevs@mail.ru

Theoretical and experimental studies to substantiate the choice of a manipulator for a harvester are presented. A mathematical model of the harvester's operation has been developed based on natural and production-technological factors, as well as the characteristics of the machine base and the harvester head. The characteristics of the manipulator have been substantiated, in particular, the maximum reach and load moment of the manipulator for the given parameters of the base machine and the selected harvester head. When choosing a manipulator, it is recommended to proceed from the fact that some part of large trees can be left in the cutting area or dumped with chainsaws. It has been established that the manipulator boom reach within the range from 8 to 11 m has little effect on the volume and number of harvested trees. The percentage of the harvested volume of wood depends little on the boom reach of the manipulator and remains at least 90 %.

Keywords: loader, mathematical model, service simulating test

Suggested citation: Karpachev S.P., Bykovskiy M.A., Laptev A.V. *Metodika vybora manipulyatora kharvestera* [Method of selecting a harvester manipulator]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 1, pp. 123–129.

DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-123-129

References

- [1] Shelgunov Yu.V. *Mashiny i oborudovanie lesozagotovok, lesosplava i lesnogokhozyaystva* [Machines and equipment of logging, timber rafting and forestry]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Timber industry], 1982, 520 p.
- [2] Spinelli R., Hartsough B. A survey of Italian chipping operations. *Biomass and Bioenergy*, 2001, v. 21(6), pp. 433–444.
- [3] Shirnin Yu.A. *Tekhnologiya i oborudovanie lesopromyshlennykh proizvodstv. Ch. 1. Lesosechnye raboty* [Technology and equipment of forest industry. Part 1. Logging work]. Moscow: MGUL, 2004, 445 p.
- [4] Eliasson L., von Hofsten H., Johannesson T., Thierfelder T. Effects of sieve size on chipper productivity, fuel consumption and chip size distribution for open drum chippers. *Croatian J. of Forest Engineering*, 2015, v. 36(1), pp. 11–17.
- [5] Mihelic M., Spinelli R., Poje A. Production of Wood Chips from Logging Residue under Space-Constrained Conditions. *Croatian J. of Forest Engineering*, 2018, v. 39(2), pp. 223–232.
- [6] Vinogorov G.K. *Lesosechnye raboty* [Logging work]. Moscow: Lesnaya prom-t' [Forest industry], 1981, 272 p.
- [7] Karpachev S.P., Zaprudnov V.I., Bykovskiy M.A., Karpacheva I.P. Simulation Studies on Line Intersect Sampling of Residues Left After Cut-to-Length Logging. *Croatian J. of Forest Engineering*, 2020, v. 41 (1), pp. 95–107. DOI: <https://doi.org/10.5552/crojfe.2020.531>
- [8] Salminen E.O., Gurov S.V., Bol'shakov B.M. *Razmeshchenie volokov na zabolochennykh uchastkakh* [Placement of portages on wetlands]. *Lesnaya promyshlennost'* [Forestry], 1988, no. 3, pp. 32–33.
- [9] Baranovskiy V.A., Nekrasov R.M. *Sistemy mashin dlya lesozagotovok* [Systems of machines for logging]. Moscow: Lesnaya prom-t' [Forest industry], 1977, 248 p.
- [10] Magagnotti N., Spinelli R. Good practice guidelines for biomass production studies; WG2 Operations research and measurement methodologies. *Sesto Fiorentino, Italy: COST Action FP-0902 and CNR Ivalsa*, 2012, 52 p.
- [11] Ryzhkov A.E., Prokazin N.E. *Sistema dobrovol'noy lesnoy sertifikatsii PEFC-FCR, otsenka lesoupravleniya, lesopol'zovaniya i ispechki postavok lesoproduktsii na sootvetstvie mezhdunarodnym trebovaniyam* [PEFC-FCR voluntary forest certification system/assessment of forest management, forest use and supply chain of forest products for compliance with international requirements]. Moscow: PEFC-FCR, 1916, 254p.
- [12] Spinelli R., Nati C., Magagnotti N. Recovering logging residue: experiences from the Italian Eastern Alps. *Croatian J. of Forest Engineering*, 2007, v. 28(1), pp. 1–9.
- [13] Grigor'ev I.V., Zhukova A.I. *Koordinatno-ob'emnaya metodika trassirovaniya pri osvoenii lesosek trelevkoy* [Coordinatevolumetric tracing technique in the development of skidding sites]. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*, 2004, no. 4, pp. 40–44.
- [14] Gerasimov Y., Karjalainen T. Energy wood resources in Northwest Russia. *Biomass and Bioenergy*, 2011, no. 35, pp. 1655–1662.
- [15] Esteban B., Baquero G., Puig R., Riba J.R., Rius A. Is it environmentally advantageous to use vegetable oil directly as biofuel instead of converting it to biodiesel? *Biomass Bioenergy*, 2011, no. 35, pp. 1317–1328. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.025> (accessed 01.02.2020).
- [16] Syuney V.S. *Sravnienie tekhnologiy lesosechnykh rabot v lesozagotovitel'nykh kompaniyakh Respubliki Kareliya* [Comparison of logging technologies in logging companies of the Republic of Karelia]. Joensuu: Finnish Forest Research Institute METLA, 2008, 126 p.
- [17] Makarenko A.V., Bykovskiy M.A., Laptev A.V. *Effektivnost' vypolneniya tekhnologicheskikh operatsiy pri provedenii vyborochnykh rubok lesa* [The efficiency of technological operations during selective logging] *Aktual'nye problem razvitiya lesnogo kompleksa. Materialy 13-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, 01–02 dekabrya 2015 g. Vologodskiy gosudarstvennyy universitet* [Actual problems of the development of the forest complex. Materials of the 13th International Scientific and Technical Conference, December 01–02, 2015. Vologda State University]. Vologda: VSTU, 2016, pp. 32–37.
- [18] Grigor'ev I.V., Zhukova A.I., Grigor'eva O.I., Ivanov A.V. *Sredoshchadyashchie tekhnologii razrabotki lesosek v usloviyakh severo-zapadnogo regiona Rossiyskoy Federatsii* [Mediating technologies for the development of cutting areas in the northwestern region of the Russian Federation]. St. Petersburg: SPbGLTA, 2008, 174 p.

- [19] Gerts E.F. *Otsenka tekhnologii lesopol'zovaniya na lesosechnykh rabotakh* [Evaluation of forest technology in logging work]. Ekaterinburg: USFU, 2003, 120 p.
- [20] Makarenko A.V. *Optimizatsiya razmeshcheniya seti trelevochnykh volokov na lesoseke* [Optimizing the placement of a network of skidding trails in the cutting area. Logging production: problems and solutions]. Lesozagotovitel'noe proizvodstvo: problemy i resheniya. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Minsk, BGTU, 26–28 aprelya 2017 g. [Materials of the international scientific and technical conference, Minsk, BSTU, April 26–28, 2017]. Minsk: BSTU, 2017, pp. 233–237.
- [21] Galaktionov O.N. *Tekhnologicheskiy protsess lesozagotovok i resursy lesosechnykh otkhodov* [Technological process of logging and resources of logging waste]. Petrozavodsk: PetrSU, 2007, 95 p.
- [22] Kuznetsov V.I. *Predstavlyаем firmu «Lestekhkom» — novoe kachestvo lesozagotovitel'noy tekhniki* [We represent Lestekkom, a new quality of logging equipment] *Lesnaya promyshlennost'* [Forest Industry], 2006, no. 1, pp. 12–14.
- [23] Piskunov M.A. *Raspredelenie prokhodov forvardera i postroenie optimal'nykh skhem raspolozheniya trelevochnykh volokov na lesoseke* [Distribution of forwarder passes and the construction of optimal layouts of skidding tracks in the cutting area]. *Vestnik Volga State University of Technology. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* [Forest. Ecology. Nature use], 2017, no. 2 (34), pp. 37–48.
- [24] Grigor'ev I.V. *Snizhenie otritsatel'nogo vozdeystviya na pochvu kolesnykh traktorov obosnovaniem rezhimov ikh dvizheniya i tekhnologicheskogo oborudovaniya* [Reducing the negative impact on the soil of wheeled tractors by justifying the modes of their movement and technological equipment]. St. Petersburg: SPbGLTA, 2006, 236 p.
- [25] Derbin V.M., Derbin M.V. *Tekhnologiya raboty kharvestera pri vyborochnykh rubkakh* [The technology of the harvester's work in selective felling]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering Journal], 2016, no. 2, pp. 69–75. DOI: 10.12737/19956

Authors' information

Karpachev Sergey Petrovich — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), karpachevs@mail.ru

Bykovskiy Maksim Anatol'evich — Cand. Sci. (Tech.) Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), bykovskiy@mgul.ac.ru

Laptev Aleksandr Valentinovich — Senior Lecturer of the BMSTU (Mytishchi branch), laptev@mgul.ac.ru

Received 16.10.2020.

Accepted for publication 16.11.2020.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОЙ ТЕПЛОФИКАЦИИ ПРИ ТРАНСФОРМАЦИИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ, ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ В СЕРВЕРНЫХ СТАНЦИЯХ

Е.Г. Комаров¹, В.В. Лозовецкий¹, В.В. Лебедев², В.М. Черкина³

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

²Российский технологический университет, 107996, Москва, ул. Стрормынка, д. 20

³ФГБОУ ВО «Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское ш., д. 26

fuzzykom@gmail.com

Представлены результаты проектного моделирования системы кондиционирования помещений серверных станций, выделяющих при работе значительное количество теплоты, отводимой в окружающую среду. Произведена оценка теплового баланса и потенциала тепловой энергии типовой серверной станции. На базе анализа составляющих материально-энергетического баланса разработана математическая модель системы кондиционирования в виде блочно-модульной сплит-системы, учитывающая теплообмен при осушении воздуха в процессе его охлаждения. Предложена схема теплонасосной теплофикации, утилизирующей тепло серверной станции, при кондиционировании воздуха в помещении и рассмотрены результаты оптимизации ее параметров. Получены оптимальные параметры рассматриваемой теплотехнической схемы, включая схему контура термодинамической трансформации тепловой энергии, что позволяет оценить величину коэффициента преобразования тепловой энергии пароконденсационного теплонасосного цикла в достаточно широком диапазоне температуры кипения и конденсации. Результаты работы можно использовать при проектировании систем кондиционирования помещений серверных станций с попутной утилизацией теплоты на нужды теплофикации.

Ключевые слова: система вентиляции и кондиционирования, воздухоохладитель, холодильный контур, тепловой баланс, осушение влажного воздуха, утилизация тепла, тепловой насос

Ссылка для цитирования: Комаров Е.Г., Лозовецкий В.В., Лебедев В.В., Черкина В.М. Моделирование системы автономной теплофикации при трансформации тепловой энергии, образующейся в серверных станциях // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 1. С. 130–139. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-130-139

Серверные станции — источники больших тепловыделений; в стойке (серии CAV-DS) с 20 типовыми блоками сервера (PRIMER-GYRX300S5) мощность тепловыделения при их одновременной работе составляет 16 кВт. Эта теплота отводится в окружающую среду, приводя к ее тепловому загрязнению.

Цель работы

Цель работы — определение теплового баланса и потенциала тепловой энергии типовой серверной станции, которую можно использовать на нужды теплофикации, экономя тем самым невозобновляемые источники энергии в виде ископаемого топлива и не загрязняя окружающую среду тепловыми выбросами.

Материалы и методы

Коэффициент K_S требуемой площади для размещения стоек рядами можно определить по формуле

$$K_S = \frac{\delta_o}{a} + \frac{\delta_r}{b} + \frac{\delta_o \delta_r}{ab},$$

где a — ширина стойки (~500 мм);
 b — глубина стойки (~1000 мм);

δ_o — расстояние между стойками в ряду (~500 мм);

δ_r — расстояние между соседними рядами стоек (~1000 мм), $K_S = 3$.

Площадь помещения S_R для четного числа стоек определится по формуле

$$S_R = n(ab)K_S.$$

Количество серверных стоек (n), расположенных в два ряда по восемь стоек в ряду на площади S_R , составляет

$$n = \frac{S_R}{K_S ab} \cong 16,$$

при мощности тепловыделения при одновременной работе $Q_{\text{и}} = 256$ кВт, которая определяет уровень необходимой холодопроизводительности установки кондиционирования воздуха без учета дополнительной нагрузки при конденсации влаги на теплообменных поверхностях охладителя и других источниках тепла [1, 2].

Теплотехническая схема модели автономной системы кондиционирования представлена в виде блочно-модульной сплит-системы (рис. 1).

Воздух из помещения подается вентилятором 5 на охлаждение в теплообменник-испаритель

тель 1 (в автономных устройствах это испаритель холодильной машины кондиционера). Испаритель 1 и вентилятор 5 входят в состав внутреннего блока блочно-модульного кондиционера (например, сплит-системы) или моноблочного кондиционера и связан контуром циркуляции хладагента с компрессором 2 и конденсатором 3. На линии подачи хладагента из конденсатора 3 в испаритель 1 установлен терморегулирующий клапан 4, разделяющий стороны высокого и низкого давления. Конденсатор 3 охлаждается вентилятором 6 наружным воздухом. При механической системе вентиляции приточный воздух может охлаждаться перед распределением по помещениям в теплообменнике 7 приточной вентиляционной установки.

Рассмотрим расчетно-технологическую схему кондиционирования воздуха в помещении с центральной системой кондиционирования, в которой все теплообменники — теплообменник-воздухоохладитель приточной вентиляционной установки 11, фанкойлы 1 внутренних блоков для доводочного кондиционирования воздуха — подключены в контур системы холодоснабжения с жидким теплоносителем (водой, растворами солей, водными растворами этиленгликоля и др.), подаваемым насосом 4 через распределительный коллектор на вход каждого теплообменника и в теплообменник-охладитель 6 (рис. 2).

Теплоноситель из охладителя 6 отводится в резервуар 5 и возвращается насосом 4 в теплообменники-доводчики 1 и теплообменник-воздухоохладитель приточной вентиляционной установки 11. Теплообменник-охладитель 6 является испарителем центральной холодильной машины, включенным в нее по контуру хладагента, с компрессором 7, конденсатором 8 и терморегулирующим клапаном 10. Конденсатор 8

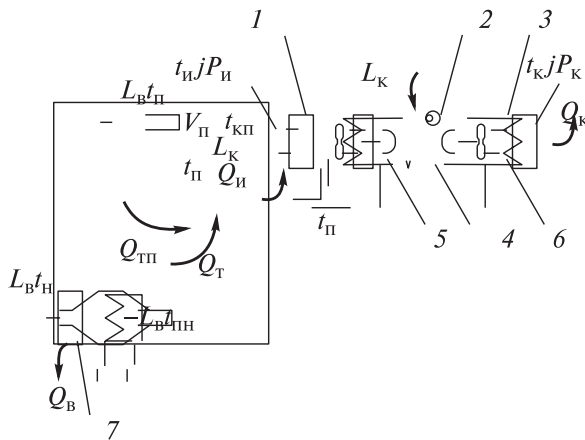


Рис. 1. Расчетно-технологическая схема локального кондиционирования с блочно-модульными установками
 Fig. 1. Calculation scheme of local air conditioning with block-modular installations

охлаждается наружным воздухом, подаваемым вентилятором 9. Отличие состоит в величине холодопроизводительности, которая в центральном кондиционере равна сумме холодопотребления теплообменников в контуре холодоснабжения. Теплота из конденсаторов холодильных установок отводится в окружающую среду. Ее использование с помощью теплонасосных циклов повысит энергетическую эффективность и снизит тепловое загрязнение окружающей среды [3–9].

Уравнение нестационарного теплового баланса помещения при кондиционировании, приведенное к параметрам воздуха в помещении, можно представить в виде

$$(1 + f)(Cp)_в V_п \frac{dt_п}{d\tau} = Q_{т.п} + \sum_j Q_j + \sum_i Q_{технi} + Q_{вен} - Q_{о.к}, \tag{1}$$

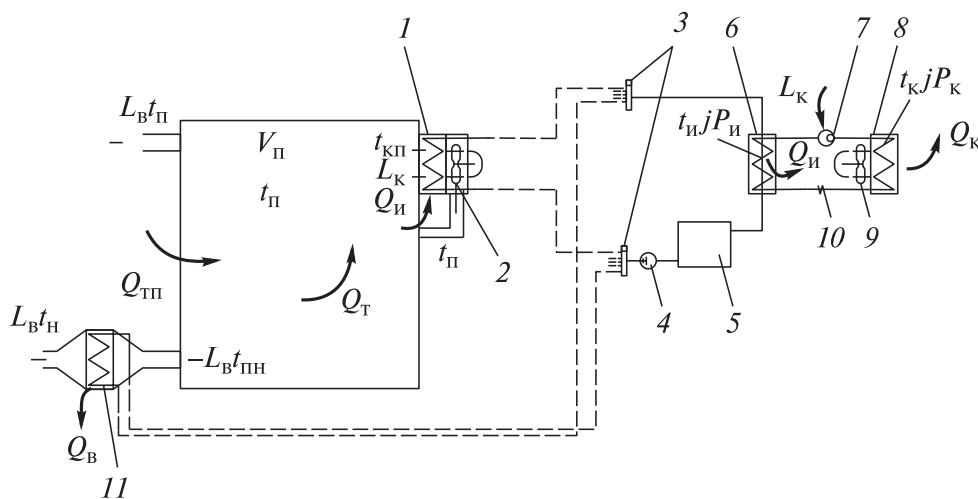


Рис. 2. Расчетно-технологическая схема центрального кондиционирования с фанкойлами
 Fig. 2. Calculation scheme of central air conditioning with fancoil units

где $f = \frac{\sum_j (Cm)_j dt'_j}{(C\rho)_B V_{п.п} dt_{п.п}}$ — функция отношения тепло-

емкостей всех объектов в помещении к теплоемкости воздуха;

C_B — массовая теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°C);

ρ_B — плотность воздуха, кг/м³;

$V_{п.п}$ — объем помещения, м³;

$t_{п.п}$ — температура воздуха в помещении, °C;

$Q_{т.п}$ — тепловая мощность теплопритоков через стены и перекрытия в помещение, Вт;

$\sum_j Q_j$ — сумма тепловыделений внутри объектов, Вт;

$\sum_i Q_{технi}$ — сумма теплопритоков от технологических процессов, Вт;

$Q_{вен}$ — теплопритоки или теплоотвод при вентиляционном воздухообмене, Вт;

$Q_{о.к}$ — теплоотвод за счет охлаждения воздуха в воздухоохладителе кондиционера (поз. 1 на рис. 1 или на рис. 2), Вт.

Уравнение (1) определяет холодопроизводительность системы при поддержании температуры воздуха и позволяет анализировать переходные процессы. Теплоотвод в воздухоохладителе характеризуется изменением внутренней энергии воздуха, рециркулируемого через него в помещении. Изменение отнесенной к единице массы «сухого» воздуха энтальпии влажного воздуха при охлаждении имеет вид

$$\Delta I = I_1 - I_2 = (C_B + d_1 C_{п.п})(t_1 - t_2) + (d_1 - d_2)(C_{п.п} t_2 + r_{п.п}) \quad (2)$$

В формуле (2) второе слагаемое отлично от нуля и учитывает выделение скрытой теплоты конденсации $r_{п.п}$ при выпадении влаги. В стационарном режиме уравнение теплового баланса (1) преобразуется для расчета холодопроизводительности кондиционера

$$Q_{о.к} = Q_{т.п} + \sum_j Q_j + \sum_j Q_{технi} + Q_{вен} \quad (3)$$

$$L_K = \frac{Q_{т.п} + \sum_j Q_j + \sum_j Q_{технi} + Q_{вен} - [\rho_B L_B (d_{п.в} - d_{п.п}) + g_{п.п}](C_{п.п} t_{п.к} + r_{п.п})}{\rho_B (C_B + d_{п.п} C_{п.п})(t_{п.п} - t_{п.к})} = \frac{Q_{т.п} + \sum_j Q_j + \sum_i Q_{технi} + \rho_B L_B (C_B + d_{п.в} C_{п.п})(t_{п.в} - t_{п.п})}{\rho_B (C_B + d_{п.п} C_{п.п})(t_{п.п} - t_{п.к})} + \frac{\rho_B L_B C_{п.п} (d_{п.в} - d_{п.п})(t_{п.п} - t_{п.к}) - g_{п.п} (C_{п.п} t_{п.к} + r_{п.п})}{\rho_B (C_B + d_{п.п} C_{п.п})(t_{п.п} - t_{п.к})} \quad (7)$$

Из полученных формул следует, что наличие влаги в воздухе помещения влияет на теплотехнические параметры системы. Выделения влаги в виде водяного пара и диоксида углерода в помещениях гражданских зданий связаны с

Холодопроизводительность воздухоохладителя $Q_{хпву}$ приточной вентиляционной установки (поз. 7 на рис. 2) при его наличии составляет

$$Q_{хпву} = L_B \rho_B C_B (t_{п.п} - t_{п.в}) = L_B \rho_B (I_{п.п} - I_{п.в}) \quad (4)$$

Если в установившемся режиме температура воздуха равна ее нормативному значению, то формула для определения необходимого расхода воздуха через воздухоохладитель кондиционера принимает вид

$$L_K = \frac{Q_{т.п} + \sum_j Q_j + \sum_j Q_{технi} + Q_{вен}}{(C\rho)_B (t_{п.п} - t_{п.к})} = \frac{Q_{т.п} + \sum_j Q_j + \sum_j Q_{технi} + Q_{вен}}{\rho_B (I_{п.п} - I_{п.к})} \quad (5)$$

Параметры воздуха соответствуют санитарно-гигиеническим нормам помещений серверных станций [1, 2]. Температура воздуха, поступающего в помещение из кондиционера, не может быть ниже температуры воздуха в нем на 7...15 °C, а влажность в установившемся режиме определяется по уравнению материального баланса водяных паров в воздухе помещения

$$d_{п.к} = \frac{d_{п.п} (L_B + L_K) \rho_B - d_{п.в} L_B \rho_B - g_{п.п}}{L_K \rho_B} \quad (6)$$

где $d_{п.в}$, $d_{п.п}$, $d_{п.к}$ — влагосодержания соответственно приточного вентиляционного воздуха, воздуха в помещении и поступающего в него из охладителя кондиционера, кг/кг; $g_{п.п}$ — поступление в воздух помещения водяных паров, кг/с.

С учетом зависимости энтальпии влажного воздуха после охладителя кондиционера $I_{п.к}$ от влагосодержания $d_{п.к}$ и температуры $t_{п.к}$ и уравнений (2), (5) и (6) получаем

параметрами дыхания и составляют: количество водяного пара, выделяемого при выдохе, $G_{H_2O}^{мин} = 353,8$ мг/мин (22,1 мг/выдох); углекислого газа при спокойном дыхании $G_{CO_2}^{мин} = 628,5$ мг/мин (39,3 мг/выдох) [10–12].

Необходимый воздухообмен можно определить по формуле

$$L_b \geq \frac{g_j}{\text{ПДК}_j - C_{Hj}} = \frac{60g_j}{\left(\frac{\mu}{V_\mu}\right)(ppm_j^{\text{ПДК}} - ppm_j^H)}, \quad (8)$$

где L_b — требуемый воздухообмен, м³/ч;
 g_j — газовыделение, мг/мин;
 $ppm_j^{\text{ПДК}}$, ppm_j^H — объемное содержание вредного компонента газовой смеси, частей на миллион;
 μ — молекулярная масса компонента, г/моль (кг/кмоль);
 V_μ — объем компонента при нормальных условиях, 22,4 л/моль (м³/кмоль).

Охлаждение влажного воздуха приводит к конденсации влаги при температуре ниже точки росы, входящей в выражение

$$p_n = \frac{\Pi d}{\frac{\mu_n}{\mu_b} + d} = p_{n,n}(t_{т.р}), \quad (9)$$

где Π — атмосферное давление, или давление влажного воздуха;
 $p_n, p_{n,n}$ — парциальные давления водяных паров и насыщенных водяных паров соответственно;
 $t_{т.р}$ — температура точки росы;
 d — влагосодержание влажного воздуха;
 μ_n, μ_b — соответственно, молекулярная масса водяного пара и «сухого» воздуха.

В поверхностных воздухоохладителях — пластинчато-ребристых теплообменниках кондиционеров температура воздуха между пластинами переменна по сечению [13, 14]. Влага конденсируется на стенке при ее температуре ($t_{т.р}$) ниже точки росы и в объеме движущегося влажного воздуха с образованием тумана при температуре ($t_{я.п}$) в ядре потока ниже точки росы. Критериями возможного выпадения влаги являются неравенства: $t_{ст} \leq t_{т.р}$ — при начале поверхностной конденсации; $t_{я.п} \leq t_{т.р}$ — при начале образования тумана. Материальный и энергетический баланс влажного воздуха связан с изменением его состояния, для малого участка поверхности теплопередачи в направлении движения влажного воздуха они записываются в виде системы уравнений

$$\begin{cases} d(G_b I) = -\alpha(t - t_{ст})dF_{т.о.}; & d(G_b x) = -\beta(x - x_{ст})dF_{р.ф.}; \\ dG_b = 0; & G_{б.н} = G_b + G_n; & x = \frac{G_n}{G_b}; & dG_n = G_b dx; \\ I = C_b t + x(C_n t + r_n). \end{cases} \quad (10)$$

где $G_b, G_n, G_{б.н}$ — массовые расходы «сухого» воздуха, водяного пара и паровоздушной смеси, кг/с;

I — энтальпия влажного воздуха, Дж/кг «сухого» воздуха;
 $x, x_{ст}$ — паросодержание в ядре потока и у стенки, кг/кг «сухого» воздуха;
 $t, t_{ст}$ — температура влажного воздуха в ядре потока и у стенки, °С;
 C_b, C_n — массовая теплоемкость «сухого» воздуха и водяного пара, Дж/(кг·°С);
 r_n — скрытая теплота парообразования воды, Дж/кг;
 α — коэффициент теплоотдачи от потока к стенке, Вт/(м²·°С);
 β — коэффициент массоотдачи из потока к поверхности раздела фаз, кг/(м²·с);
 $dF_{р.ф}$ — элемент поверхности раздела фаз, м²;
 $dF_{т.о}$ — элемент поверхности теплообмена, совпадающий практически с поверхностью стенки, м².

Паросодержание в потоке уменьшается при выпадении влаги аналогично влагосодержанию, характеризующему равновесные состояния влажного воздуха, и рассматривается в динамической системе — потоке влажного воздуха, в килограммах на один килограмм «сухого» воздуха. При конденсации у стенки на поверхности пленки или капель имеет место значительная неравномерность, обусловленная движением пара к поверхности раздела фаз, вблизи которой его концентрация уменьшается при конденсации. Первое уравнение в системе (10) отражает тепловой, а второе — материальный баланс в системе. Левая часть первого в системе (10) уравнения отражает уменьшение внутренней энергии влажного воздуха при охлаждении и конденсации влаги на бесконечно малом участке поверхности теплообмена. Правая часть первого уравнения в первой строке (10) описывает тепломассообмен: коэффициент теплоотдачи учитывает теплоту к поверхности раздела фаз при конденсации пара. Левая часть второго уравнения отражает уменьшение количества пара при осушении влажного воздуха при конденсации. Правая часть второго уравнения описывает массообмен.

В дальнейшем будем учитывать следующее:

1) производная энтальпии влажного воздуха по паросодержанию имеет вид

$$\frac{dI}{dx} = (C_b + C_n x) \frac{dt}{dx} + (C_n t + r_n); \quad (11)$$

2) формула для коэффициента теплоотдачи учитывает перенос латентного тепла конденсирующегося пара к поверхности теплопередачи [15, 16]

$$\alpha = \alpha_o \left(1 + (C_n t + r_n) \frac{\beta(x - x_{ст})}{\alpha_o(t - t_{ст})} \right), \quad (12)$$

где α_0 — коэффициент теплоотдачи, определенный без учета сопряженного переноса массы и латентного тепла, т. е. коэффициент «сухой» теплоотдачи, Вт/(м²·°C).

Выражение в правой части уравнения (12) в скобках, является коэффициентом влаговыпадения ξ

$$\xi = 1 + (C_n t + r_n) \frac{\beta(x - x_{cr})}{\alpha_0(t - t_{cr})} \quad (13)$$

Выпадение влаги $\xi > 1$ свидетельствует об увеличении коэффициента теплоотдачи при теплоотдаче, т. е. о возрастании теплового потока при дополнительном выделении скрытой теплоты парообразования при конденсации по отношению к составляющей теплового потока, связанной с теплотой охлаждения воздуха.

Исключив переменные $dF_{т.о}$ и $dF_{р.ф}$ в выражениях (10) и (11), получаем дифференциальное уравнение, связывающее температуру и паросодержание влажного воздуха в ядре потока в воздухоохладителе

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\beta f_{р.ф}}{\alpha_0} (C_b + C_n x) \frac{(x - x_{cr})}{(t - t_{cr})} \quad (14)$$

где $f_{р.ф} = \frac{dF_{р.ф}}{dF_{т.о}} \approx \frac{F_{р.ф}}{F_{т.о}}$ — отношение поверхностей раздела фаз и теплообмена.

При их значительном различии коэффициент $f_{р.ф}$ может быть переменным и выше 1, например, при конденсации на поверхности тонкодисперсной жидкой фазы. Используем в выражении (14) вместо уравнения для «сухой» теплоотдачи формулу для «сухой» теплопередачи и получаем

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\beta f_{р.ф}}{K_o} (C_b + C_n x) \frac{(x - x_{cr})}{(t - t_n)} \quad (15)$$

$$t_{cr} = t - \frac{K_o}{\alpha_0} (t - t_n); x_{cr} = \frac{\mu_n}{\mu_b} \frac{p_{н.п}(t_{cr})}{\Pi - p_{н.п}(t_{cr})}$$

где K_o — коэффициент теплопередачи при «сухом» охлаждении влажного воздуха, Вт/(м²·°C);

t_n — температура хладагента, °C.

Температура хладагента в общем случае переменна вдоль поверхности теплообмена, а температура кипения в воздухоохладителе-испарителе в контуре холодильной машины может быть принята $t_n \approx \text{const}$. Более точное выражение для коэффициента влаговыпадения ξ следует из выражения (14) или уравнений (15)

$$\begin{aligned} \xi &= 1 + (C_n t + r_n) \frac{\beta f_{р.ф} (x - x_{cr})}{\alpha_0 (t - t_{cr})} = \\ &= 1 + (C_n t + r_n) \frac{\beta f_{р.ф} (x - x_{cr})}{K_o (t - t_n)} = \\ &= 1 + \frac{dx}{dt} \frac{C_n t + r_n}{C_b + C_n x}. \end{aligned} \quad (16)$$

Коэффициент влаговыпадения является нелинейной функцией в силу нелинейности уравнений (14) и (15), не может быть задан постоянной величиной, как это часто встречается при составлении инженерных расчетов воздухоохладителей.

Площадь теплообмена $F = -\int_1^2 \frac{G_b dI}{\alpha(t - t_{cr})}$ и при из-

вестных распределениях энтальпий, температур и паросодержаний вдоль потока определяется уравнениями (15). При отсутствии конденсации воздухоохладитель рассчитывается как обычный теплообменник без учета выпадения влаги. При допущении $t_n \approx \text{const}$ можно получить аналитическое решение уравнения (15)

$$\frac{dx}{d\vartheta} = (a + bx) \frac{(x - x_{cr})}{\vartheta} \quad (17)$$

где $t_{cr}(\vartheta, t_n, \Phi_2) = t + \vartheta \left(1 - \frac{K_o}{\alpha_0}\right)$;

$$x_{cr}(\vartheta, t_n, \Phi_2) = \frac{\mu_n}{\mu_b} \frac{p_{н.п}(t_{cr})}{\Pi - p_{н.п}(t_{cr})}; \quad \vartheta = t - t_n;$$

$$\Phi_1 = \frac{\beta f_{р.ф}}{K_o}; \quad \Phi_2 = \frac{K_o}{\alpha_0}; \quad a = \Phi_1 C_b; \quad b = \Phi_1 C_n.$$

Дифференциальное уравнение (17) предложенной модели при начальных условиях 35 имеет аналитическое решение

$$x = \frac{(C_o - \psi_2) e^{b\psi_1} a \vartheta^2}{1 - (C_o - \psi_2) e^{b\psi_1} b \vartheta^2} \quad (18)$$

где $C_o = \frac{x_o}{\vartheta_o^a (a + bx_o)}$; $\psi_1(\vartheta) = \int_{\vartheta_o}^{\vartheta} \frac{x_{cr}(\vartheta)}{\vartheta} d\vartheta$;

$$\psi_2(\vartheta) = \int_{\vartheta_o}^{\vartheta} \frac{x_{cr}(\vartheta) e^{-b\psi_1(\vartheta)}}{\vartheta^{a+1}} d\vartheta.$$

Результаты и обсуждение

Проведенный теоретический анализ процессов, протекающих в воздухоохладителе, позволил получить уравнения (18) и их частные решения для воздухоохладителя влажного воздуха с расходом 1,8 м³/с при давлении 10⁵ Па, начальной температуре 20 °C и относительной влажности 50 % при его охлаждении до 10 °C. В частности

представим изменение паросодержания, свидетельствующее о росте эффективности осушения с ростом массоотдачи (рис. 3).

К концу процесса охлаждения влажного воздуха значения коэффициента влаговывадения ξ , формула (16) свидетельствуют о его снижении (рис. 4).

Это подтверждает вывод о нелинейном характере решения и переменности коэффициента влаговывадения в воздухоохладителе. Разность температуры потока t_n и температуры точки росы $t_{r,p}$ при моделировании для типовых условий остается положительной, т. е. на всем протяжении охлаждения сохраняются условия поверхностной конденсации без образования тумана. При дальнейшем охлаждении влажного воздуха туман может образовываться.

Установлена зависимость площади поверхности теплообмена от параметров задачи и изменения разности температур между хладагентом и ядром потока влажного воздуха в воздухоохладителе (рис 5).

Рост поверхности охлаждения объясняется увеличением тепловой нагрузки, которое связано с ростом объемов конденсации влаги.

Представленные данные позволяют сделать следующие выводы:

- при температуре стенки ниже точки росы происходит поверхностная конденсация водяных паров из потока влажного воздуха и его осушение;

- в последних сечениях воздухоохладителя создаются условия для образования тумана, т. е. конденсации водяных паров в ядре потока;

- снижение температуры кипения ниже $0\text{ }^\circ\text{C}$ может привести к образованию инея в выходных сечениях теплообменника вследствие отрицательных значений температуры поверхности, обращенной к влажному воздуху;

- интенсивность конденсации повышается при снижении температуры кипения (на $1\text{ }^\circ\text{C}$ она увеличивается на $0,318\text{ }\%$ к базовому варианту);

- при увеличении коэффициента массоотдачи в n раз она увеличивается в $0,904n$ раза, т. е. практически пропорционально;

- рост коэффициента теплопередачи в n раз за счет интенсификации теплоотдачи на стороне кипения увеличивает интенсивность в $0,947n$ раз;

- конденсация влаги увеличивает тепловую нагрузку на контур охлаждения воздухоохладителя за счет выделения скрытой теплоты парообразования (при недостаточной холодопроизводительности воздух не охлаждается до требуемых параметров, что подтверждает выводы работ [13, 14, 17, 18]);

- выпадение влаги увеличивает потери напора при движении воздуха и снижает его расход через теплообменник и тепловую нагрузку на него; при

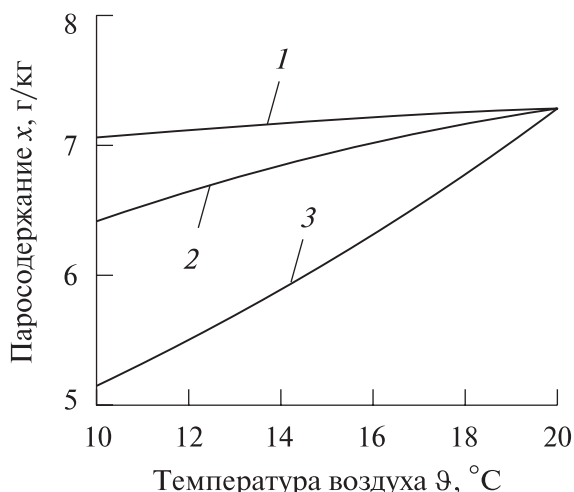


Рис. 3. Изменение паросодержания при осушении воздуха в поверхностном охладителе кондиционера (кривые на графике соответствуют значениям параметра $\Phi_1 = \frac{\beta f_{p,\phi}}{K_0}$, (кг·К)/Дж): 1 — $\Phi_1 = 1,407 \cdot 10^{-4}$; 2 — $\Phi_1 = 7,037 \cdot 10^{-4}$; 3 — $\Phi_1 = 3,519 \cdot 10^{-3}$; начальное паросодержание — 7,26 г/кг

Fig. 3. Change in steam content during air dehumidification in the surface cooler of the air conditioner (curves on the graph correspond to the parameter values $\Phi_1 = \frac{\beta f_{p,\phi}}{K_0}$, (kg · K)/J): 1 — $\Phi_1 = 1,407 \cdot 10^{-4}$; 2 — $\Phi_1 = 7,037 \cdot 10^{-4}$; 3 — $\Phi_1 = 3,519 \cdot 10^{-3}$; initial steam content — 7,26 g/kg

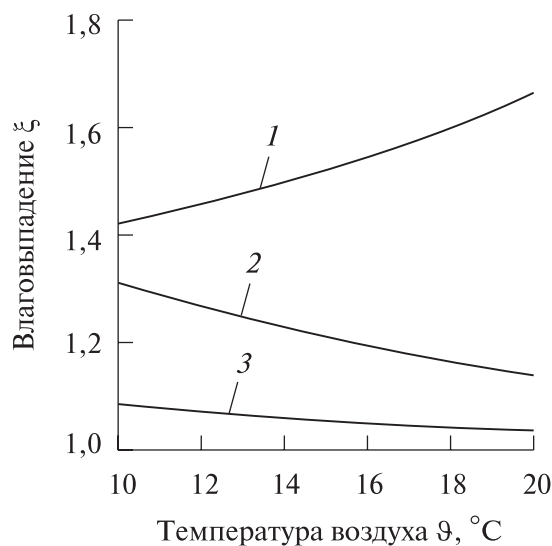


Рис. 4. Изменение коэффициента влаговывадения: кривые на графике соответствуют значениям $\Phi_1 = \frac{\beta f_{p,\phi}}{K_0}$ (см. рис. 3)

Fig. 4. Change in moisture loss coefficient: the curves on the graph correspond to the values $\Phi_1 = \frac{\beta f_{p,\phi}}{K_0}$ (see Fig. 3)

массовой скорости воздуха $5,2\text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, характерной для воздухоохладителей, при выпадении влаги более $0,3\text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ потери могут превы-

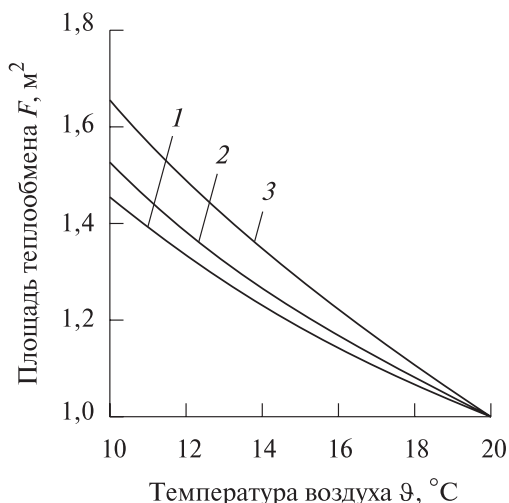


Рис. 5. Зависимость площади теплообмена от перепада температур между хладагентом и ядром потока в воздухоохладителе: расход охлаждаемого воздуха, 1,8 м³/с; коэффициент «сухой» теплоотдачи с его стороны 50 Вт/(м²·К); кривые соответствуют значениям $\Phi_1 = \frac{\beta f_{p,\Phi}}{K_o}$ (см. рис. 3)

Fig. 5. Dependence of the heat exchange area on the temperature difference between the refrigerant and the core of the flow in the air cooler: flow rate of cooled air, 1,8 m³/s; coefficient of «dry» heat transfer from its side is 50 W / (m²·K); the curves correspond to the values $\Phi_1 = \frac{\beta f_{p,\Phi}}{K_o}$ (see Fig. 3)

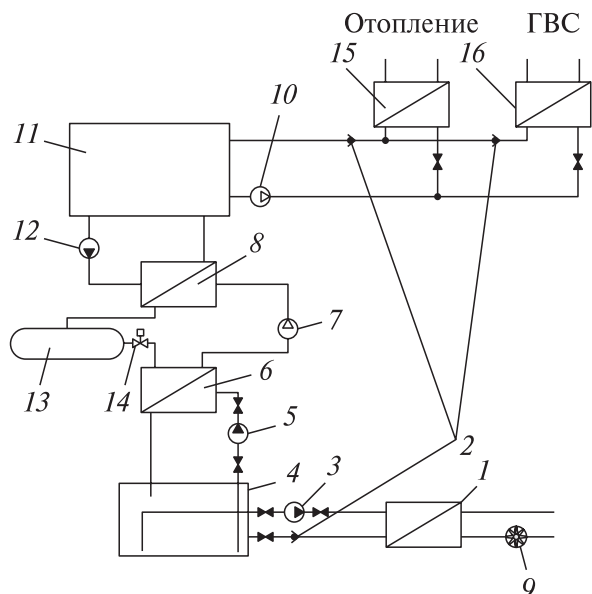


Рис. 6. Схема теплонасосной утилизации тепла воздуха в системе кондиционирования серверных станций: 1 — воздухоохладитель системы кондиционирования; 2 — обратный клапан; 3, 5 — насосы хладагента; 4 — бак хладагента; 6 — холодильник теплового насоса; 7 — компрессор; 8 — нагреватель-конденсатор; 9 — вентилятор; 10 — теплофикационный насос; 11, 12 — бак и насос теплоносителя; 13 — ресивер; 14 — терморегулирующий клапан; 15, 16 — соответственно системы отопления и горячего водоснабжения серверной станции

Fig. 6. Scheme of heat pump utilization of air heat in the air conditioning system of server stations: 1 — air cooler of the air conditioning system; 2 — check valve; 3, 5 refrigerant pumps; 4 — refrigerant tank; 6 — heat pump cooler; 7 — compressor; 8 — heater-condenser; 9 — fan; 10 — heating pump; 11, 12 — coolant tank and pump; 13 — receiver; 14 — thermostatic valve; 15, 16 — respectively, heating and hot water supply systems of the server station

шать потери в «сухом» режиме в 1,8 раза; при влажности ниже 0,3 кг/(м²·ч) рост потерь резко снижается, приближаясь к потерям при «сухом» режиме; в базовом варианте удельная интенсивность выпадения влаги составляет 0,126 кг/(м²·ч), при росте потерь в 1,55 раза [18].

Утилизировать тепловыделение серверов следует охлаждая конденсаторы систем кондиционирования воздуха в схемах с промежуточным теплоносителем и аккумуляцией тепловой энергии, направляя ее в системы отопления и горячего водоснабжения зданий серверных станций (рис. 6).

Мощность компрессора теплового насоса определяется степенью повышения давления паров хладагента и его расходом, который определяется холодопроизводительностью системы. Мощность электропривода вентилятора равна произведению производительности на создаваемый им напор, который при работе на сеть должен быть равен потерям в каналах теплообменников. Производительность вентилятора зависит от

тепловой нагрузки и от принимаемого изменения температуры воздуха при прохождении через них.

Потери в теплообменнике зависят от скорости воздуха, геометрической конфигурации его каналов, их материала, и других факторов: выпадения влаги на поверхности теплообмена или в каналах, учет которых необходим при выполнении полнопрофильного проектирования [12, 18–22]. Тепловая мощность конденсатора 8 равна сумме мощности компрессора и холодопроизводительности теплового насоса. Параметры контура теплового насоса и теплообменников зависят от минимальных разностей температур в них, определенных путем оптимизации. Оптимальные значения для испарителя теплового насоса равны 5...15 °С, а для конденсатора теплового насоса 3...11 °С.

Учитывая оптимальные параметры рассматриваемой теплотехнической схемы, в том числе схему контура термодинамической трансформации тепловой энергии, значение коэффициента преобразования тепловой энергии пароконденсаци-

онного теплонасосного цикла η при температуре кипения от -5 до 0 °С и температуре конденсации 60 °С составит

$$\eta = \frac{Q_k}{Q_n} = \frac{Q_n + N_k}{Q_n} \cong 2,5.$$

Выводы

При тепловой нагрузке на воздухоохладитель кондиционера $Q_n = 256$ кВт в теплонасосном цикле тепловая мощность для теплофикации составит $Q_k = \mu Q_n = 640$ кВт.

Утилизируя ее, можно получить примерно 10 т/ч воды, нагреваемой от 10 до 60 °С, для отопления и горячего водоснабжения.

Использование данного энергетического эффекта позволяет экономить невозобновляемые источники энергии при эксплуатации постоянно возрастающих мощностей вычислительных информационных систем и снизить вредную нагрузку на окружающую среду.

Список литературы

[1] СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование. М.: Госстрой РФ, 2004. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200035579> (дата обращения 14.10.2019).

[2] СН 512-78. Инструкция по проектированию зданий и помещений для электронно-вычислительных машин. М.: Госстрой, 2000. URL: <http://docs.cntd.ru/document/901707386> (дата обращения 14.10.2019).

[3] Лозовецкий В.В., Лебедев В.В., Черкина В.М. Снижение тепловой нагрузки на окружающую среду с помощью тепловых насосов в системе очистки сточных вод // Инженерно-физический журнал, 2018. Т. 91. № 2. С. 504-512.

[4] Проценко В.П., Пустовалов С.Б., Савицкий А.И., Лагутенко С.К. Атомно-теплонасосная теплофикация (АТТ) как новое направление в развитии энергетики // Энергосбережение и водоподготовка, 2010. № 1 (63). 5 с.

[5] Закиров Д.Г. Состояние и перспективы использования низкопотенциальной теплоты с помощью тепловых насосов // Промышленная энергетика, 2004, № 6. С. 2-9.

[6] Янговский Е.И. Левин Л.А. Промышленные тепловые насосы. М.: Энергоатомиздат, 1989 г. URL: <https://eknigi.org/tehnika/>

87483-promyshlennye-teplovye-nasosy.html (дата обращения 24.12.2019).

[7] Соколов Е.Я., Бродянский В.М. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения. М.: Энергоиздат, 1981. 320 с.

[8] Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. М.: МЭИ, 1983. 416 с.

[9] Хайнрих Г., Найорк Х., Нестлер В. Теплонасосные установки для отопления и горячего водоснабжения / под ред. Б.К. Явнеля. М.: Стройиздат, 1985. 351 с.

[10] Василенко В.Х. Дыхательная система // Малая медицинская энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1968. Т. 10. С. 209.

[11] Здания жилые и общественные. Нормы воздухообмена. М.: Авок Стандарт, 2002. 15 с.

[12] ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. М.: МНТКС. 2013. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-30494-2011> (дата обращения 14.10.2019).

[13] Гоголин А.А. Осушение воздуха холодильными машинами. М.: Госторгиздат, 1962. 105 с.

[14] Баркалов Б.В., Карпис Е.Е. Кондиционирование воздуха в промышленных, общественных и жилых зданиях. М.: Стройиздат, 1971. 269 с.

[15] Теплофизические основы получения искусственного холода. // Холодильная техника, справочник / под ред. А.В. Быкова, А.А. Гоголина. М.: Пищевая пром-сть, 1980. 231 с.

[16] Дульнев Г.Н., Новиков В.В. Процессы переноса в неоднородных средах. Л.: Энергоатомиздат, 1991. 247 с.

[17] Кожевникова Е.В., Лопаткина Т.А. Калориметрический комплекс для исследования теплоотдачи в теплообменниках и испытания кондиционеров Электронный ресурс // Холодильная техника и кондиционирование, 2010. № 1. URL: <http://www.openmechanics.com/journals> свободный (дата обращения 14.10.2019).

[18] Рекомендации по расчету поверхностных воздухоохладителей для систем кондиционирования воздуха и вентиляции. М.: Госстрой СССР, 1969. 133 с.

[19] Хаузен Х. Теплопередача при противотоке, прямотоке и перекрестном токе. М.: Энергоиздат, 1981. 384 с.

[20] Попырин Л.С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок. М.: Энергия, 1978. 416 с.

[21] Холодильное дело. URL: <http://holod-delo.ru/refrigeration/index.htm> (дата обращения 19.10.2019).

[22] Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: справочник / под ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. М.: Энергоатомиздат, 1988. 560 с.

Сведения об авторах

Комаров Евгений Геннадиевич — д-р. техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), fuzzykom@gmail.com

Лозовецкий Вячеслав Владимирович — д-р. техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), lozovetsky@mail.ru

Лебедев Владимир Владимирович — канд. техн. наук, доцент Московского технологического университета МИРЕА, voval_matr@mail.ru

Черкина Вера Михайловна — канд. техн. наук, доцент Московского государственного строительного университета, khina75@mail.ru

Поступила в редакцию 14.01.2020.

Принята к публикации 15.05.2020.

AUTONOMOUS HEATING SYSTEM DURING TRANSFORMATION OF THERMAL ENERGY FORMED IN SERVER STATIONS

E.G. Komarov¹, V.V. Lozovetsky¹, V.V. Lebedev², V.M. Cherkina³

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

²Russian Technological University, 20, Stromynka st., 107996, Moscow, Russia

³Moscow State Building University (NIU MGSU), 26, Yaroslavl highway, 129337, Moscow, Russia

fuzzykom@gmail.com

Results of design modeling of air-conditioning and central air of premises of server stations are presented. The estimation of thermal balance of typical server station is made. The potential of thermal energy which can be used is estimated it is useful for needs of central heating, to save power resources, and not to pollute environment thermal emissions. The detailed analysis of components of is material-power balance is made. The mathematical model of central air is developed for these purposes. Analysis problems of the heat substances exchange processes, the drainage of air connected with processes, occurring at its cooling are considered. The designing and operation problems interfaced with the heat substances exchange in air coolers are considered. The heat pump scheme of system is offered the central heating, utilizing warmly server station at air conditioning indoors. The model is offered and results of optimization of parameters heat pump schemes are considered. Results can be applied at designing of central airs of premises of server stations with passing recycling of thermal emissions for needs of central heating.

Keywords: ventilation and air-conditioning system, an air cooler, a refrigerating contour, thermal balance, drainage of damp air, heat recycling, thermal pump

Suggested citation: Komarov E.G., Lozovetsky V.V., Lebedev V.V., Cherkina V.M. *Modelirovanie sistemy avtonomnoy teplofikatsiya pri transformatsii teplovoy energii, obrazuyushchetsya v servernykh stantsiyakh* [Autonomous heating system during transformation of thermal energy formed in server stations]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 1, pp. 130–139. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-130-139

Reference

- [1] *SNiP 41-01–2003. Otoplenie, ventilyatsiya i konditsionirovanie* [SNiP 41-01–2003 Heating, ventilation and air conditioning]. Moscow: Gosstroy RF, 2004. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200035579> (accessed 14.10.2019).
- [2] *SN 512–78. Instruksiya po proektirovaniyu zdaniy i pomeshcheniy dlya elektronno-vychislitel'nykh mashin* [CH 512–78 Instructions for the design of buildings and premises for electronic computers]. Moscow: Gosstroy, 2000. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/901707386> (accessed 14.10.2019).
- [3] Lozovetskiy V.V., Lebedev V.V., Cherkina V.M. *Snizhenie teplovykh nagruzki na okruzhayushchuyu sredu s pomoshch'yu teplovykh nasosov v sisteme ochistki stochnykh vod* [Reducing the heat load on the environment using heat pumps in the wastewater treatment system]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* [Engineering Physics Journal], 2018, v. 91, no. 2, pp. 504–512.
- [4] Protsenko V.P., Pustovalov S.B., Savitskiy A.I., Lagutenko S.K. *Atomno-teplonasosnaya teplofikatsiya (ATT) kak novoe napravlenie v razvitií energetiki* [Nuclear heat pump district heating (ATT) as a new direction in the development of energy]. *Energoberezhenie i vodopodgotovka* [Energy saving and water treatment], 2010, no. 1 (63), 5 p.
- [5] Zakirov D.G. *Sostoyanie i perspektivy ispol'zovaniya nizkopotentsi-al'noy teploty s pomoshch'yu teplovykh nasosov* [State and prospects of using low-grade heat with the help of heat pumps]. *Promyshlennaya energetika* [Promyshlennaya energetika], 2004, no. 6, pp. 2–9.
- [6] Yantovskiy E.I. Levin L.A. *Promyshlennyye teplovye nasosy* [Industrial heat pumps]. Moscow: Energoatomizdat, 1989. Available at: <https://eknigi.org/tehnika/87483-promyshlennyye-teplovye-nasosy.html> (accessed 24.12.2019).
- [7] Sokolov E.Ya., Brodyanskiy V.M. *Energeticheskie osnovy transformatsii tepla i protsessov okhlazhdeniya* [Energy bases of heat transformation and cooling processes]. Moscow: Energoizdat, 1981, 320 p.
- [8] Kirillin V.A., Sychev V.V., Sheyndlin A.E. *Tekhnicheskaya termodinamika* [Technical thermodynamics]. Moscow: MEI, 1983, 416 p.
- [9] Khaynrikh G., Nayork X., Nestler V. *Teplonasosnye ustanovki dlya otopleniya i goryachego vodosnabzheniya* [Heat pump installations for heating and hot water supply]. Ed. B.K. Yavnel. Moscow: Stroyizdat, 1985, 351 p.
- [10] Vasilenko V.Kh. *Dykhatel'naya sistema* [Respiratory system]. *Malaya meditsinskaya entsiklopediya* [Small Medical Encyclopedia]. Moscow: Soviet Encyclopedia, 1968, t. 10, p. 209.
- [11] *Zdaniya zhilye i obshchestvennye. Normy vozdukhooobmena* [Residential and public buildings. Air exchange rates]. Moscow: Avok Standard, 2002, 15 p.
- [12] *GOST 30494–2011. Zdaniya zhilye i obshchestvennye. Parametry mikroklimata v pomeshcheniyakh* [GOST 30494–2011. Residential and public buildings. Indoor microclimate parameters]. Moscow: MNTKS, 2013. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/gost-30494-2011> (accessed 14.10.2019).
- [13] Gogolin A.A. *Osushenie vozdukh kholodil'nymi mashinami* [Air dehumidification with refrigeration machines]. Moscow: Gostorgizdat, 1962, 105 p.
- [14] Barkalov B.V., Karpis E.E. *Konditsionirovanie vozdukh v promyshlennykh, obshchestvennykh i zhilykh zdaniyakh* [Air conditioning in industrial, public and residential buildings]. Moscow: Stroyizdat, 1971, 269 p.
- [15] *Teplofizicheskie osnovy polucheniya iskusstvennogo kholoda* [Thermophysical bases for obtaining artificial cold]. *Kholodil'naya tekhnika, spravochnik* [Refrigeration equipment, reference book]. Ed. A.V. Bykov, A.A. Gogolin. Moscow: Food Industry, 1980, 231 p.
- [16] Dul'nev G.N., Novikov V.V. *Protsessy perenosa v neodnorodnykh sredakh* [Transfer processes in heterogeneous media]. Leningrad: Energoatomizdat, 1991, 247 p.

- [17] Kozhevnikova E.V., Lopatkina T.A. *Kalorimetricheskii kompleks dlya issledovaniya teplootdachi v teploobmennikakh i ispytaniya konditsionerov Elektronnyy resurs* [Calorimetric complex for the study of heat transfer in heat exchangers and testing of air conditioners Electronic resource]. *Kholodil'naya tekhnika i konditsionirovanie* [Refrigeration technology and air conditioning], 2010, no. 1. Available at: <http://www.openmechanics.com/journals/free> (accessed 14.10.2019).
- [18] *Rekomendatsii po raschetu poverkhnostnykh vozdukhookhladiteley dlya sistem konditsionirovaniya vozdukha i ventilyatsii* [Recommendations for the design of surface air coolers for air conditioning and ventilation systems]. Moscow: Gosstroy USSR, 1969, 133 p.
- [19] Khauzen Kh. *Teploperedacha pri protivotoke, pryamotoke i perekrestnom toke* [Heat transfer in counterflow, co-current and cross-flow]. Moscow: Energoizdat, 1981, 384 p.
- [20] Popyrn L.S. *Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya teploenergeticheskikh ustanovok* [Mathematical modeling and optimization of thermal power plants]. Moscow: Energiya, 1978, 416 p.
- [21] *Kholodil'noe delo* [Refrigeration business]. Available at: <http://holod-delo.ru/refrigeration/index.htm> (accessed 19.10.2019).
- [22] *Teoreticheskie osnovy teplotekhniki. Teplotekhnicheskiy eksperiment: spravochnik* [Theoretical foundations of heat engineering. Thermal Engineering Experiment]. Ed. V.A. Grigoriev, V.M. Zorin. Moscow: Energoatomizdat, 1988, 560 p.

Authors' information

Komarov Evgeniy Gennadievich — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), fuzzykom@gmail.com

Lozovetskiy Vyacheslav Vladimirovich — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), lozovetskiy@mail.ru

Lebedev Vladimir Vladimirovich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Russian Technological University, voval_matr@mail.ru

Cherkina Vera Mikhaylovna — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Moscow State Building University (NIU MGSU), khina75@mail.ru

Received 14.01.2020.

Accepted for publication 15.05.2020.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В СЕГМЕНТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Д.Ю. Клехо¹, Е.Б. Карелина¹, Ю.П. Батырев²

¹ФГБОУ ВО «Российский государственный гуманитарный университет», 125993, г. Москва, Миусская пл., д. 6

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

Liza200785@gmail.com

Приведена классификация и описание задач, решаемых с помощью технологий компьютерного зрения. Более подробно рассмотрено применение нейронных сетей для создания систем выделения конкретных объектов в потоке изображений. Также даны пояснения, что понимается под обучением нейронной сети и подробно рассмотрены основные этапы машинного обучения. Указаны особенности применения сверточных нейронных сетей при сегментации объектов изображения, т. е. выделении объектов на изображении. Сделан выбор архитектуры нейронной сети, обладающей свойством выделять из изображения основную информацию. Дана характеристика задачи сегментации и основных принципов компьютерного зрения. Приведены выводы о возможном применении разработанной нейросетевой модели для решения различных прикладных задач.

Ключевые слова: машинное обучение, глубокое обучение, нейронные сети, компьютерное зрение, машинное зрение, сегментация, сегментация объектов, обработка изображений

Ссылка для цитирования: Клехо Д.Ю., Карелина Е.Б., Батырев Ю.П. Использование технологии сверточных нейронных сетей в сегментации объектов изображения // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 1. С. 140–145. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-140-145

В настоящее время все более расширяется количество предприятий, на которых осуществляется внедрение различных автоматизированных систем, поскольку они позволяют снизить материальные и трудовые затраты предприятий, а также повысить их конкурентоспособность [1]. Достаточно часто на производстве возникают проблемы, которые невозможно формализовать и решить с помощью роботов, контроллеров и регуляторов. В таком случае предлагается интеграция интеллектуальных технологий в производственный процесс или создание на их основе новых систем [1].

Технологии, связанные с интеллектом весьма разнообразны. К ним относятся нечеткая логика и генетические алгоритмы, экспертные системы и искусственные нейронные сети, а также компьютерное зрение [2]. При этом часто появляется необходимость в их совместном использовании, в частности, при создании экспертной системы с применением искусственных нейронных сетей [3]. Рассмотрим один из подходов к разработке системы компьютерного зрения для распознавания образов на изображении с помощью нейронной сети. Такую систему, например, можно применять при наблюдении за сельскохозяйственными животными с использованием видеоинформации, полученной с камер наблюдения, поскольку контроль за животными позволяет автоматизировать процессы кормления и ухода за ними [4].

Цель работы

Цель работы — создание и интеграция автоматизированной системы компьютерного зрения

(АСКЗ) для распознавания образов на изображении в условиях производства, сокращение влияния человеческого фактора на принятие решений в производстве и повышение конкурентоспособности готовой продукции.

Материалы и методы

В широком смысле компьютерное зрение применяется в самых различных областях: в медицине — для ранней диагностики заболевания, в пищевой промышленности — для определения оптимального цвета и внешнего вида готовой продукции, в легкой промышленности — для выделения образа рисунка из общего изображения, а также в качестве измерения различных физических параметров при определении пространственного местоположения для подтверждения определенных свойств объекта, считывания различных кодов, в том числе в сфере безопасности для идентификации личности [5, 6].

Компьютерное зрение выступает в роли вспомогательного инструмента, чтобы автоматизировать деятельность, которую человек способен осуществлять практически на подсознательном уровне — различать видимые им объекты. Глаза выступают в роли приемников сигнала, мозг — в качестве обработчика, но, точнее, не мозг, а некоторая часть биологической нейронной сети [7]. Искусственные нейронные сети симулируют обработку информации подобно биологическим, но крайне ограничено в концепте математической логики [8]. Различают ряд архитектур искусственных нейронных сетей, предназначенных

для решения подобных задач, одна из которых тесно связана и хорошо себя проявила в решении задач компьютерного зрения — это архитектура сверточных нейронных сетей.

Перечислим задачи компьютерного зрения [8, 9].

Классификация изображений — наиболее простая и понятная в реализации задача по сравнению с другими, в связи с чем спектр ее предметных областей достаточно широк [10].

Детектирование объектов — это процесс нахождения экземпляров таких реальных объектов, как лица, велосипеды, здания в изображениях или на видео. Алгоритмы обнаружения объектов обычно используют математические функции и методы обучения для распознавания экземпляров категории объекта [11].

Семантическая сегментация — разделение изображения на отдельные группы пикселей, которые соответствуют какому-либо одному объекту. При этом определяется принадлежность данного объекта к определенному классу реального мира.

Сегментация экземпляров идентифицирует каждый экземпляр какого-либо объекта, представленного на изображении, в отличие от семантической сегментации, не разбивает изображение на пиксели. [12–14].

Результаты и обсуждение

Перечисленные выше классы задач не являются единственными. Существуют типы задач, образованные как частные случаи перечисленных: распознавание лиц, текстов и т. д. [9, 15]. Такие задачи компьютерного зрения обусловлены потребностью решения проблем в специфических предметных областях. Рассмотрим на примере решение проблемы распознавания образов на большом изображении с применением технологии сверточных нейронных сетей, в задаче семантической сегментации (рис. 1) [16].

На изображении городской улицы необходимо выделить такие объекты как автотранспорт и пешеходы (люди). Изображение вначале разбивается на отдельные пиксели, которые впоследствии объединяются в некоторые классы реальных объектов — автомобили и люди. Область объединенных пикселей выделяется определенным цветом. Причем области, относящиеся к разным классам объектов, окрашены разными цветами. Поэтому на рис. 1 нейронная сеть выделила автомобили голубым, а людей — оранжевым цветом. Как видно, объекты распознаны верно.

Важным моментом в решении вышеописанной задачи, является обучение нейронной сети. В общем смысле под обучением понимается процесс настройки параметров нейронной сети посредством моделирования среды, в которую эта сеть

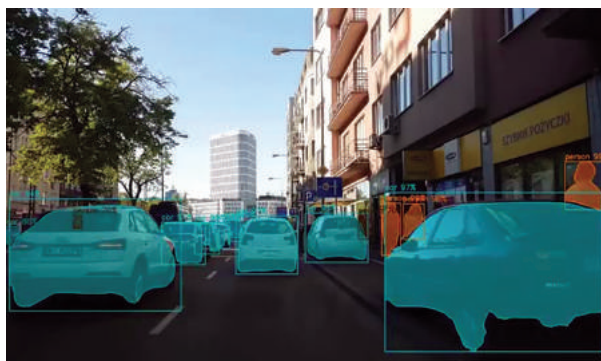


Рис. 1. Результат проведения семантической сегментации объектов

Fig. 1. The result of the semantic segmentation of objects



Рис. 2. Разметка объекта (в данном случае — внешние повреждения на поверхности транспортного средства) на изображении

Fig. 2. Object marking (in this case — external damage on the vehicle surface) in the image

встроена. Наиболее популярными алгоритмами являются: обучение с учителем и обучение без учителя (самоорганизующиеся сети). Для задач сегментации целесообразно использовать алгоритм обучения с учителем, когда на вход сети подается заранее подготовленный образец параметров с известным требуемым выходом сети. Входные параметры посредством корректировки весов проходят обработку внутри структуры нейронной сети, вычисляется выходной сигнал, который сравнивается с соответствующим значением требуемого выходного параметра. Сеть считается обученной, когда ошибка сравнения равна нулю или соответствует предельно допустимому значению ошибки.

Любой процесс решения задачи машинного обучения, в частности компьютерного зрения, подразделяется на этапы [15].

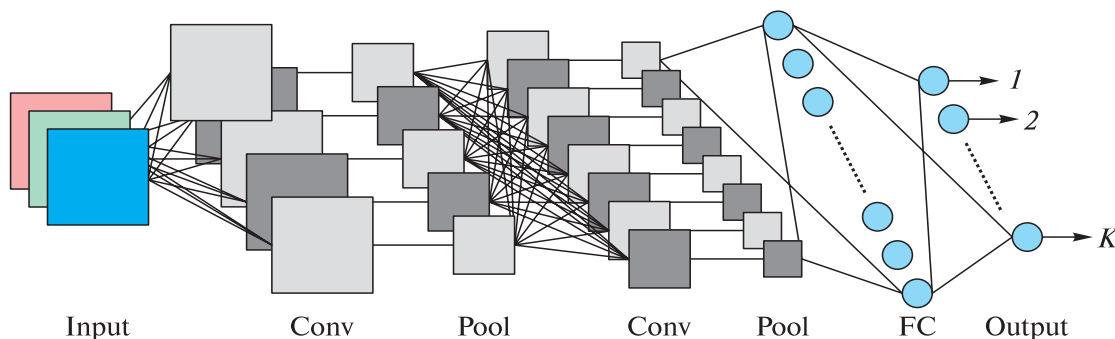


Рис. 3. Архитектура сверточной нейронной сети: Input — изображения, подаваемые на вход нейронной сети; Conv, Pool — слои свертки; FC — промежуточный слой для преобразования результатов в виде наборов фитчей; Output — выходной слой нейронной сети, $1, 2, \dots, K$ — набор фитчей рассматриваемого изображения

Fig. 3. Architecture of the convolutional neural network: Input — images fed to the input of the neural network; Conv, Pool — convolution layers; FC — intermediate layer for converting results in the form of sets of features; Output — output layer of the neural network, $1, 2, \dots, K$ — set of features of the considered image

Этап первый — подготовка данных для обучения нейросетевой модели. Проводится сбор данных объектов, которые будут сегментироваться с помощью нейронной сети — изображений животных, находящихся на ферме [17]. Собранные данные должны иметь разметку сегментов, которые будут подаваться на вход нейронной сети для ее последующего обучения, т. е. координаты областей: форма частей тела, отличающих одно животное от другого, размеры животных и пр. Разметка сохраняется в файлах в виде .txt, .csv, .xml и прочих форматов с расположением изображения, которые на данном этапе не подвергаются изменениям (рис. 2).

Этап второй — выбор архитектуры нейронной сети, в частности архитектура сверточной нейронной сети, которая имеет свойство выделять из изображения основную информацию в виде фитчей с помощью сверточных слоев.

Такая архитектура получает на входной слой нормализованное изображение со стандартизированным размером (Input), если в этом есть необходимость. Внутренние слои представляют собой подряд идущие слои свертки, со слоями нормализации (Conv) и пуллинга (Pool). Под слоем свертки следует понимать слой, который преобразует часть входного изображения, матрицу 3×3 , в пиксель 1×1 с помощью матричных преобразований. На выходном слое данного типа архитектуры получаем набор фитчей рассматриваемого изображения ($1, 2, \dots, K$) (рис. 3) [20].

Сверточные нейронные сети имеют разновидности архитектур, которые были созданы под разные задачи компьютерного зрения, под различные предметные области [10]. Для рассматриваемой задачи обычная сверточная нейронная сеть не подходит, необходима сеть с наличием информации о расположении объектов. Для обучения сети возьмем архитектуру Mask R-CNN (Mask Regions with CNN feature) (рис. 4).

Для семантической сегментации архитектура R-CNN выделяет два типа фитчей для каждого из регионов: карта фитчей заднего плана и карта фитчей всего региона изображения. Это позволяет сохранить информацию о расположении файла на исходном изображении.

Этап третий — загрузка данных и обучение нейронной сети. Созданная ранее разметка необходима для подачи информации об изображении в нейронную сеть. Процесс обучения и проверка качества обученной модели зависит от того, качественно ли была проведена разметка, насколько большой набор данных мы имеем и в каких пропорциях данные разделены на train, validate и test выборки, где первая послужит для обучения, вторая — для проверки качества модели во время обучения и подбора гиперпараметров, третья — для итогового тестирования модели на тех данных, которые не участвовали в обучении сети. Данные в выборке train, для более качественного обучения, должны изменяться перед каждым их пропуском через нейронную сеть в процессе обучения.

Изменение изображения в рамках процесса обучения перед подачей в сеть называется аугментацией, например, перевернуть изображение горизонтально или вертикально, изменить цвет, растянуть его и т.д. Аугментации применяются только на этапе обучения, преимущественно только для обучающей выборки [8, 9].

Независимо от всех проведенных изменений, каждое из изображений необходимо преобразовать в тензор — четырехмерный массив размерностью (batch_size, rgb, h, w) изображения, где batch_size — количество изображений, которое погружается в сеть одновременно (при работе с одним изображением, данный показатель равен 1), rgb — цифра 3, отражающая RGB-спектр, h — высота изображения, w — ширина изображения.

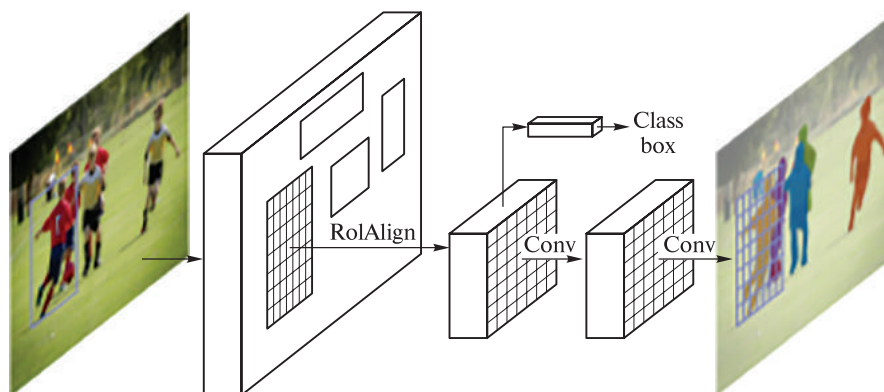


Рис. 4. Архитектура Mask R-CNN: RoIAlign — слой сети с информацией о расположении объекта; Class box — набор данных о расположении объектов на исходных изображениях

Fig. 4. Mask R-CNN architecture: RoIAlign — network layer with information about the location of the object; Class box — a set of data about the location of objects in the source images

На этапе обучения используются только два набора данных: для обучения (train), и для валидации (validate), чтобы в ходе обучения минимизировать функцию потерь с помощью метода градиентного спуска. Выбор функции потерь зависит от типа задачи компьютерного зрения. Так, для задания детекции для нескольких классов подойдет функция потерь Multi-Class Cross-Entropy Loss

$$L(\hat{y}, y) = -\sum_k^K y^{(k)} \log \hat{y}^{(k)}.$$

Данная функция считает функцию потерь для K классов, где y и \hat{y} — количество объектов каждого для каждого из классов. Также необходимо во время обучения нейросетевой модели считать функцию потерь (по формуле), запоминать это значение, и для минимального значения запомнить веса модели, именно такие будут оптимальными для решения задачи выделения каждого животного на общем изображении [15, 17, 18].

Этап четвертый — тестирование модели. Пропускаем данные для тестирования через обученную нейронную сеть и получаем результат [19]. Анализируем полученные данные и делаем вывод о возможности введения разработанной нейросетевой модели в опытную эксплуатацию.

Выводы

Разработанная и обученная нейросетевая модель способна сегментировать объекты на изображении в производственной среде. Задача была решена с помощью машинного обучения, в частности, с использованием компьютерного зрения. Это позволяет сократить время на принятие решения управления процессом производства. Модель применима для выделения сельскохозяйственных

животных из станков заказчика агросектора, а также для мониторинга каждой из особей, позволяющего фиксировать изменения в их поведении, например активность передвижения объекта на протяжении суток или более продолжительного периода времени, потребность в питании и его частоту.

Внедрение модуля детектирования и трекинга сельскохозяйственных животных на базе технологий сверточных нейронных сетей является важным этапом развития аграрного сектора экономики, позволяет повысить общую эффективность труда работников и, как следствие, будет способствовать повышению прибыли предприятия за счет оптимизации процесса содержания животных.

Следует добавить, что подобные нейросетевые модели можно также использовать в задачах идентификации музейных экспонатов, определении повреждений различных поверхностей и мониторинга дорожно-транспортных ситуаций.

Список литературы

- [1] Lu D., Weng Q. A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance // International J. of Remote Sensing, 2007, v. 28, no. 5, pp. 823–870.
- [2] LeCun Y., Boser B., Denker J.S., Henderson D., Howard R.E., Hubbard W., Jackel L.D. Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition // Neural Computation, 1989, no. 1(4), pp. 541–551.
- [3] Сикорский О.С. О влиянии цветового пространства изображения на обучение сверточной нейронной сети в задаче классификации изображений // Новые информационные технологии в автоматизированных системах, 2018. № 21. С. 340–343.
- [4] Карелина Е.Б., Клехо Д.Ю., Батырев Ю.П. Разработка интеллектуальной системы управления технологическим процессом бестарного хранения муки // Лесной Вестник. Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 1. С. 124–130.

- [5] Ле Мань Х. Сверточная нейронная сеть для решения задачи классификации // Труды МФТИ, 2016. Т. 8. № 3. С. 91–97.
- [6] Рысьмятова А.А. Использование сверточных нейронных сетей. М.: МГУ, 2016. 34 с.
- [7] Бахтеев Д.В. Компьютерное зрение и распознавание образов в криминалистике. Екатеринбург: Российское право: Образование. Практика. Наука, 2019. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/kompyuternoe-zrenie-i-raspoznavanie-obrazov-v-kriminalistike> (дата обращения 26.06.2020).
- [8] Благовещенская М.М., Карелина Е.Б., Клехо Д.Ю. Внедрение SCADA-системы TRACE MODE в производственные процессы на примере бестарного хранения муки // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий, 2015. № 2 (64). С. 82–85.
- [8] Анисимов Б.В., Курганов В.Д., Злобин В.К. Распознавание и цифровая обработка изображений. М.: Высшая школа, 1983. 295 с.
- [10] Денисенко А.А. Решение задачи бинарной классификации при помощи сверточных нейронных сетей с использованием фреймворка Tensorflow // Технические науки: проблемы и решения: сборник статей по материалам XX международной научно-практической конференции. СПб.: Свое издательство, 2019. С. 1–4.
- [11] Степанов П.П. Искусственные нейронные сети // Молодой ученый, 2017. № 4 (138). С. 185–187.
- [12] Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / пер. с польск. И.Д. Рудинского. М.: Финансы и статистика, 2004. 344 с.
- [13] Reynolds D. A., Quatieri T. F., Dunn R. B. Speaker verification using adapted Gaussian mixture models // Digital signal processing, 2000, t. 10, no. 1–3, pp. 19–41.
- [14] Маниюкова Н.В. Компьютерное зрение как средство извлечения информации из видеоряда. Нижневартовск: Математические структуры и моделирование, 2015. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompyuternoe-zrenie-kak-sredstvo-izvlecheniya-informatsii-iz-videoryada> (дата обращения 26.06.2020).
- [15] Тархов Д.А. Нейросетевые модели и алгоритмы. М.: Радиотехника, 2017. 787 с.
- [16] Форсайт Д., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. М.: Вильямс, 2004. 928 с.
- [17] Васильев А.Н., Тархов Д.А. Принципы и техника нейросетевого моделирования. М.: СИНТЕГ, 2017. 218 с.
- [18] Писаревский А.Н., Чернявский А.Ф., Афанасьев Г.К. Системы технического зрения (принципиальные основы, аппаратное и математическое обеспечение). Л.: Машиностроение, 1988. 423 с.
- [19] Гелиг А.Х., Матвеев А.С. Введение в математическую теорию обучаемых распознающих систем и нейронных сетей. М.: СПбГУ, 2017. 224 с.
- [20] Marsic I. Computer Networks: Performance and Quality of Service. US: Rutgers University, 2013. 500 p.

Сведения об авторах

Клехо Дмитрий Юрьевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Информационные технологии и системы», Российский государственный гуманитарный университет, Kleho62@mail.ru

Карелина Екатерина Борисовна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Информационные технологии и системы», Российский государственный гуманитарный университет, Liza200785@gmail.com

Батырев Юрий Павлович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Системы автоматического управления», МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), batyrev@mgul.ac.ru

Поступила в редакцию 25.09.2020.

Принята к публикации 19.10.2020.

DEVELOPMENT OF INTELLIGENT PROCESS CONTROL SYSTEM FOR IMAGE SEGMENTATION

D.Yu. Klekho¹, E.B. Karelina¹, Yu.P. Batyrev²

¹Russian State University for the Humanities, 6, Miusskaya square, 125993, Moscow, Russia

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

Liza200785@gmail.com

The classification and description of the tasks solved using computer vision technologies are given. The use of neural networks to create systems for selecting objects in an image stream is considered in more detail. It also explains what is meant by training a neural network and discusses in detail the main stages of machine learning. The features of the application of convolutional neural networks for the segmentation of image objects, i.e., the selection of objects in the image, are indicated. The choice of the neural network architecture has been made, which has the property of extracting basic information from the image. The characteristics of the segmentation problem and the basic principles of computer vision are given. Conclusions are given on the possible application of the developed neural network model for solving various applied problems.

Keywords: machine learning, deep learning, computer vision, machine vision, neural network, segmentation, object segmentation, image processing

Suggested citation: Klekho D. Yu., Karelina E. B., Batyrev Yu. P. *Ispol'zovanie tekhnologii svertochnykh neyronnykh setey v segmentatsii ob'ektov izobrazheniya* [Development of intelligent process control system for image segmentation]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 1, pp. 140–145. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-140-145

References

- [1] Lu D., Weng Q. A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International J. of Remote Sensing*, 2007, v. 28, no. 5, pp. 823–870.
- [2] LeCun Y., Boser B., Denker J.S., Henderson D., Howard R.E., Hubbard W., Jackel L.D. Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition. *Neural Computation*, 1989, no. 1(4), pp. 541–551.
- [3] Sikorskiy O.S. *O vliyaniy tsvetovogo prostranstva izobrazheniya na obucheniye svertochnoy neyronnoy seti v zadache klassifikatsii izobrazheniy* [On the influence of the color space of an image on training a convolutional neural network in the problem of image classification]. *Novye informatsionnye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh* [New information technologies in automated systems], 2018, no. 21, pp. 340–343.
- [4] Karelina E.B., Klekko D.Yu., Batyrev Yu.P. *Razrabotka intellektual'noy sistemy upravleniya tekhnologicheskim protsessom bestarnogo khraneniya muki* [Development of an intelligent control system for the technological process of bulk storage of flour]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, t. 24, no. 1, pp. 124–130.
- [5] Le Man' Kh. *Svetochnaya neyronnaya set' dlya resheniya zadachi klassifikatsii* [Convolutional neural network for solving the classification problem]. *Trudy MFIT* [Proceedings of MIPT], 2016, v. 8, no. 3, pp. 91–97.
- [6] Rys'myatova A.A. *Ispol'zovanie svertochnykh neyronnykh setey* [Using convolutional neural networks]. Moscow: Moscow State University, 2016, 34 p.
- [7] Bakhteev D.V. *Komp'yuternoe zrenie i raspoznavanie obrazov v kriminalistike* [Computer vision and pattern recognition in forensic science]. Yekaterinburg: Rossiyskoe pravo: Obrazovanie. Praktika. Nauka [Russian law: Education. Practice. Science], 2019. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/v/kompyuternoe-zrenie-i-raspoznavanie-obrazov-v-kriminalistike> (accessed 26.06.2020).
- [8] Blagoveshchenskaya M.M., Karelina E.B., Klekko D.Yu. *Vnedrenie SCADA-sistemy TRACE MODE v proizvodstvennyye protsessy na primere bestarnogo khraneniya muki* [Implementation of the TRACE MODE SCADA system in production processes on the example of bulk flour storage]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy* [Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies], 2015, no. 2 (64), pp. 82–85.
- [9] Anisimov B.V., Kurganov V.D., Zlobin V.K. *Raspoznavanie i tsifrovaya obrabotka izobrazheniy* [Recognition and digital processing of images]. Moscow: Vysshaya shkola [Higher school], 1983, 295 p.
- [10] Denisenko A.A. *Reshenie zadachi binarnoy klassifikatsii pri pomoshchi svertochnykh neyronnykh setey s ispol'zovaniem freymvorka Tensorflow* [Solving the problem of binary classification using convolutional neural networks using the Tensorflow framework]. *Tekhnicheskie nauki: problemy i resheniya: sbornik statey po materialam XX mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Technical sciences: problems and solutions: a collection of articles based on the materials of the XX international scientific and practical conference]. St. Petersburg: Own Publishing House, 2019, pp. 1–4.
- [11] Stepanov P.P. *Iskustvennyye neyronnye seti* [Artificial neural networks]. *Molodoy uchenyy* [Young Scientist], 2017, no. 4 (138), pp. 185–187.
- [12] Osovskiy S. *Neyronnye seti dlya obrabotki informatsii* [Neural networks for information processing]. Moscow: Finansy i statistika [Finance and Statistics], 2004, 344 p.
- [13] Reynolds D. A., Quatieri T. F., Dunn R. B. *Speaker verification using adapted Gaussian mixture models*. *Digital signal processing*. – 2000. – T. 10. – №. 1-3. – P. 19-41.
- [14] Manyukova N.V. *Komp'yuternoe zrenie kak sredstvo izvlecheniya informatsii iz videoryada* [Computer vision as a means of extracting information from video]. Nizhnevartovsk: Matematicheskie struktury i modelirovanie [Mathematical structures and modeling], 2015. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompyuternoe-zrenie-kak-sredstvo-izvlecheniya-informatsii-iz-videoryada> (accessed 26.06.2020).
- [15] Tarkhov D.A. *Neyrosetevye modeli i algoritmy* [Neural network models and algorithms]. Moscow: Radiotekhnika, 2017, 787 p.
- [16] Forsyth D., Ponce J. *Komp'yuternoe zrenie. Sovremennyy podkhod* [Computer vision. Modern approach]. Moscow: Publishing house «Williams», 2004, 928 p.
- [17] Vasil'ev A.N., Tarkhov D.A. *Printsipy i tekhnika neyrosetevogo modelirovaniya* [Principles and techniques of neural network modeling]. Moscow: SINTEG, 2017, 218 p.
- [18] Pisarevskiy A.N., Chernyavskiy A.F., Afanas'ev G.K. *Sistemy tekhnicheskogo zreniya (printsipial'nye osnovy, apparatnoe i matematicheskoe obespechenie)* [Systems of technical vision (fundamental principles, hardware and software)]. Leningrad: Mechanical engineering. Leningrad department, 1988, 423 p.
- [19] Gelig A.Kh., Matveev A.S. *Vvedenie v matematicheskuyu teoriyu obuchaemykh raspoznayushchikh sistem i neyronnykh setey* [Introduction to the mathematical theory of learning recognition systems and neural networks]. Moscow: SPbGU, 2017, 224 p.
- [20] Marsic I. *Computer Networks: Performance and Quality of Service*. US: Rutgers University, 2013. 500 p.

Authors' information

Kleho Dmitry Yurievich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department «Information technologies and systems», Russian State University for the Humanities, Klekko62@mail.ru

Karelina Ekaterina Borisovna — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department «Information technologies and systems», Russian State University for the Humanities, Liza200785@gmail.com

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

Received 25.09.2020.

Accepted for publication 19.10.2020.



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА

11 декабря 2020 года состоялось очередное заседание Общественного совета при Федеральном агентстве лесного хозяйства. Основное внимание на нем было уделено обсуждению изменений в государственной программе Российской Федерации «Развитие лесного хозяйства».

В частности, участники заседания рассмотрели вопросы увеличения финансирования, в том числе за счет перераспределения средств с 2023 года на 2021 год на закупку техники для проведения мероприятий по охране лесов от пожаров. С учетом высказанных замечаний и предложений была одобрена корректировка значения показателей госпрограммы в связи с изменением ее финансового обеспечения.

Заместитель Министра природных ресурсов и экологии Российской Федерации — руководитель Федерального агентства лесного хозяйства Сергей Аноприенко отметил: «Текущие изменения в Госпрограмму необходимы для ее корректировки в соответствии с федеральным законом о бюджете. Они также вызваны появлением новых нормативных правовых актов, которые позволяют определить реальную потребность субъектов Российской Федерации в финансировании».

Глава Рослесхоза обратил внимание на работу Общественного совета при Федеральном агентстве лесного хозяйства в 2020 году, в частности, обсуждение новой редакции Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации, изменений законодательства, вопросов декриминализации лесного сектора, организации лесопользования и охраны лесов от пожаров, климатической повестки.

Также в ходе заседания обсуждались основные положения и параметры государственной программы «Развитие лесного хозяйства», сокращение площадей лесных пожаров на землях всех категорий и обеспечение полного цикла лесовыращивания на всех землях, где проводится искусственное лесовосстановление, и иные вопросы.

В заседании Общественного совета приняли участие глава Комиссии по экологии и окружающей среде Общественной палаты Российской Федерации Елена Шаройкина, представители Общественного совета Минприроды России, начальники управлений и подведомственных учреждений Рослесхоза, представители экспертного, научного сообществ и общественности.

Напомним, что состав Общественного совета при Федеральном агентстве лесного хозяйства утвержден в апреле 2018 года. В него входят представители 16 общероссийских, межрегиональных, региональных и международных общественных природоохранных организаций.

Пресс-служба Рослесхоза