

ЛЕСНОЙ ВЕСТНИК / FORESTRY BULLETIN

Научно-информационный журнал

№ 3 ' 2022 Том 26

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, член-корреспондент РАН, д-р с.-х. наук, ФБУ ВНИИЛМ, Москва

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

Моисеев Александр Николаевич, ст. науч. сотр., Европейский институт леса, г. 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 30.05.2022.

Тираж 600 экз.

Заказ №

Объем 19,0 п. л.

Цена свободная

LESNOY VESTNIK / FORESTRY BULLETIN

Scientific Information Journal
No. 3 ' 2022 Vol. 26

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, Corresponding Member of the RAS, Dr. Sci. (Agric.), VNIILM, Moscow
Melekhov Vladimir Ivanovich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, NARFU, Arkhangelsk
Moiseyev Aleksandr Nikolaevich, Senior Researcher, European Forest Institute, Joensuu, Finland
Nakvasina Elena Nikolaevna, Professor, Dr. Sci. (Agric.), Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Higher School of Natural Sciences and Technology, Arkhangelsk
Niemz Peter, Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c., Prof. for Wood Physics, ETH Zurich (Swiss Federal Institute of Technology in Zurich; Eidgenossische Technische Hochschule Zurich)
Oblivin Aleksandr Nikolaevich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Academician of the Russian Academy of Natural Sciences and MANVSH, Honored worker of science and equipment of the Russian Federation, BMSTU, Moscow
Pasztory, Zoltan, Dr., Ph.D., Director of Innovation Center, University of Sopron, Sopron, Hungary
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.), 000 «Kudensnik», 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 TSNIMASH, 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 30.05.2022.
Circulation 600 copies
Order №
Volume 19,0 p. p.
Price free

СОДЕРЖАНИЕ

БИОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА

Дерюгин А.А., Глазунов Ю.Б., Львов Ю.Г. Популяция ели под пологом перестойных березняков в зоне смешанных лесов европейской части России	5
Сиволапов В.А., Логинова Л.А., Воробьева Е.А., Вепринцев В.Н., Щетинкин С.В. Оценка изменений генетической структуры субпопуляций дуба черешчатого и сосны обыкновенной в условиях длительного воздействия малых доз радиации	14
Розломий Н.Г., Минхайдаров В.Ю., Белов А.Н., Хайфэн У. Современное состояние лиственницы ольгинской (<i>Larix olgensis</i> A. Henry) на Борисовском плато (Приморский край)	21
Бабаев Р.Н., Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П. Пигментация листовых пластин представителей рода береза (<i>Betula</i> L.)	29
Смирнов А.И., Аксенов П.А. Влияние низкочастотного электромагнитного поля на анатомическое строение стебля однолетних сеянцев сосны обыкновенной (<i>Pinus sylvestris</i> L.) и дуба красного (<i>Quercus rubra</i> L.)	39
Жижин С.М., Залесов С.В., Магасумова А.Г. Изменение площади сельскохозяйственных угодий в Удмуртской Республике	47
Журавлева А.Н., Бухарина И.Л., Свозилик В., Фронтасьева М.В., Загребин Е.А. Мониторинг следовых элементов на территории Удмуртской Республики методом нейтронного активационного анализа	54
Захаров В.П., Коротков С.А., Дубей Д. Изменения возрастного и породного состава Орехово-Зуевского лесничества после пожаров и вспышки массового размножения короеда-типографа 2010–2015 гг.	62
Гаврилова О.И., Грязькин А.В. Особенности самовозобновления сосны на гари	69
Коршунов Н.А., Савченкова В.А., Перминов А.В., Конюшенков М.Е. Научное обоснование методики автоматизированного управления силами и средствами пожаротушения	75

ЛАНДШАФТНАЯ АРХИТЕКТУРА

Орлова Н.Д., Раева-Богословская Е.Н., Молканова О.И. Совершенствование методики клонального микроразмножения перспективных сортов <i>Lonicera caerulea</i> L.	85
Трубина Н.Н., Мамаева Н.А., Хохлачева Ю.А. Анализ структуры коллекции сортов рода <i>Clematis</i> L. в составе современного коллекционного фонда лаборатории декоративных растений Главного ботанического сада РАН	93

ДЕРЕВООБРАБОТКА И ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

Черная Н.В., Шашок Ж.С., Карпова С.В., Усс Е.П., Мисюров О.А. Разработка способа повышения эффективности применения слабоосновных катионных полиэлектролитов в технологии бумаги и картона	105
---	-----

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Луценко Ю.С., Поливников В.М., Малашин А.А. Глобальность радиовидимости низкоорбитальных космических аппаратов	115
Ветошкин А.М., Шум А.А. Матричные представления проекторов и их приложения	125
Корольков А.В., Сапожников В.Б. Моделирование процессов осаждения топлива в баках двигательных установок разгонных блоков под действием малой перегрузки	131
Рулев М.Е., Ачильдиев В.М., Батырев Ю.П. Регистрация и обработка биофизических сигналов для неинвазивной диагностики заболеваний человека	137
Чернышов А.В. Определение максимального объема долговременного электронного архива, построенного на оптических дисках	147

CONTENTS

BIOLOGICAL AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF FORESTRY

Deryugin A.A., Glazunov Yu.B., L'vov Yu.G. Spruce population under the canopy of overmature birch forests in the mixed forest zone of the European part of Russia	5
Sivolapov V.A., Loginova L.A., Vorobyova E.A., Veprintsev V.N., Shchetinkin S.V. Common oak and Scots pine subpopulations genetic changes under prolonged exposure to low doses of radiation	14
Rozlomy N.G., Mirhaydarov V.Y., Belov A.N., Haifeng W. Olginsky larch (<i>Larix olgensis</i> A. Henry) current state on Borisov plateau (Primorsky region)	21
Babaev R.N., Besschetnova N.N., Besschetnov V.P. Genus birch (<i>Betula</i> L.) leaf plates pigmentation	29
Smirnov A.I., Aksenov P.A. Low-frequency electromagnetic field influence on anatomical stem structure of Scots pine (<i>Pinus sylvestris</i> L.) and red oak (<i>Quercus rubra</i> L.) annual seedings	39
Zhizhin C.M., Zalesov S.V., Magasumova A.G. Agricultural land change in Udmurt Republic	47
Zhuravleva A.N., Bukharina I.L., Svozilik V., Frontasyeva M.V., Zagrebin E.A. Trace elements monitoring in Udmurt Republic by neutron activation analysis	54
Zakharov V.P., Korotkov S.A., Dubey D. Age and species composition changes in Orekhovo-Zuevskoe forest division after fires and engraver beetle mass reproduction in 2010–2015	62
Gavrilova O.I., Gryazkin A.V. Pine self-regeneration in burnt forest area	69
Korshunov N.A., Savchenkova V.A., Perminov A.V., Konyushenkov M.E. Automated control methodology of fire extinguishing means scientific substantiation	75

LANDSCAPE ARCHITECTURE

Orlova N.D., Raeva-Bogoslovskaya E.N., Molkanova O.I. Clonal micropropagation improvement technique of <i>Lonicera caerulea</i> L. promising cultivars	85
Trubina N.N., Mamaeva N.A., Khokhlacheva Yu.A. Analysis of genus <i>Clematis</i> L. varieties collection in modern collection fund of Main Botanical Garden RAS Laboratory of Ornamental Plants	93

WOODWORKING AND CHEMICAL WOOD PROCESSING

Chernaya N.V., Shashok Zh.S., Karpova S.V., Uss E.P., Misyurov O.A. Application of weak cationic polyelectrolytes in paper and cardboard efficiency improvement technology	105
--	-----

MATH MODELING

Lucenko Y.S., Polivnikov V.M., Malashin A.A. Global radio visibility of low-orbit spacecraft	115
Vetoshkin A.M., Shum A.A. Matrix representations of projectors and their applications	125
Korol'kov A.V., Sapozhnikov V.B. Modeling of propellant settling processes in upper stages propulsion systems tanks under low overload	131
Rulev M.E., Achildiev V.M., Batyrev Yu.P. Biophysical signals registration and processing for non-invasive diagnosis of human diseases	137
Chernyshov A.V. Determination of the maximum volume of a long-term electronic archive built on optical disks	147

ПОПУЛЯЦИЯ ЕЛИ ПОД ПОЛОГОМ ПЕРЕСТОЙНЫХ БЕРЕЗНЯКОВ В ЗОНЕ СМЕШАННЫХ ЛЕСОВ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ

А.А. Дерюгин, Ю.Б. Глазунов✉, Ю.Г. Львов

ФГБУН «Институт лесоведения РАН» (ИЛАН РАН), 143030, Московская обл., Одинцовский р-н, с. Успенское,
ул. Советская, д. 21

root@ilan.ras.ru

Приведены результаты исследований подпологовой популяции ели в перестойных березняках кисличных Московской обл. Работы выполнены на постоянной пробной площади в период 2008–2018 гг. Установлен волнообразный характер процесса возобновления ели под пологом березняков с периодичностью 30–40 лет в пределах возраста рассматриваемых березняков. Определено, что основу формирующихся под пологом ельников составляют деревья с периодом возобновления менее 30 лет, которые к наступлению распада березняков образуют первый и второй ярусы со средним возрастом, приближающимся к возрасту количественной спелости. Дана характеристика возрастной структуры популяции ели в березняках возрастом 115 лет, отличающаяся доминированием деревьев двух возрастных групп — 21–40 и 91–120 лет, на долю которых приходится соответственно 29 % и 37 % численности популяции. Формирующиеся ельники относятся к условно разновозрастным древостоям. В вертикальной структуре популяции выявлено доминирование особей (около 40 %) высотой 2,0 м. Возрастная динамика древостоя направлена на некоторое увеличение деревьев подроста и первого яруса, при этом происходит уменьшение численности второго яруса. Это объясняется появлением новых особей ели и переходом части деревьев второго яруса в первый. Установлено, что в подпологовой популяции ели в перестойных березняках преобладают ослабленные особи. Наилучшим состоянием отличаются деревья первого яруса (категория состояния $K_C = 1$). Состояние деревьев подростка за период наблюдений не изменялось, оставаясь ослабленным ($K_C = 2,3–2,4$). Положительной динамикой характеризовалась совокупность деревьев второго яруса — из категории сильно ослабленных ($K_C = 2,7$) она за счет отпада перешла в категорию ослабленных ($K_C = 2,0$). Лучшим состоянием отличаются деревья с периодом возобновления до 30 лет. В результате сукцессионного процесса после распада березняков сформируются низкополнотные ельники с продуктивностью, соответствующей III классу бонитета.

Ключевые слова: перестойные березняки, ель под пологом, возрастная и вертикальные структуры, состояние, смешанные леса

Ссылка для цитирования: Дерюгин А.А., Глазунов Ю.Б., Львов Ю.Г. Популяция ели под пологом перестойных березняков в зоне смешанных лесов европейской части России // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 3. С. 5–13. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-5-13

Исследования сукцессионных процессов, тесно связанных со сменой пород, остаются актуальными в настоящее время. Повышенный интерес обусловлен необходимостью, в частности для эксплуатационных лесов, замены мягколиственных насаждений на хозяйственно ценные коренные хвойные насаждения. Преобладание сплошнолесосечной формы хозяйства, недостаточность объемов рубок ухода в молодняках обусловили появление в лесном фонде значительных площадей, занятых производными березняками. В Центральном федеральном округе, где расположена основная часть площади хвойно-широколиственных (смешанных) лесов, доля березовых насаждений составляет 36 %, в эксплуатационных лесах — около 20 %. Часто под пологом березняков спонтанно в ходе демулационных процессов развивается популяция ели. Ее восстановительно-возрастная динамика в березняках европейской части России была объектом

изучения многих исследователей в разных лесных районах страны [1–20]. Данная проблема являлась предметом исследований ряда зарубежных авторов [21–26]. Тем не менее слабым звеном в этих исследованиях остается недостаточная изученность процесса в березняках, находящихся в конце стадии старения — начале стадии распада.

Цель работы

Цель работы — изучение возрастной, вертикальной структуры и состояния подпологовой популяции ели в перестойных березняках возрастном 105–115 лет зоны смешанных лесов.

Объект и методы исследований

Исследования выполнены Институтом лесоведения РАН в хвойно-широколиственном (смешанном) лесном районе (Московская обл., Можайский район). Объект исследований — подпологовая популяция ели в производных перестойных березняках. Работы проводили на постоянной пробной площади (ППП), заложенной

Т а б л и ц а 1

Характеристика первого яруса древостоя на постоянной пробной площади

Characteristics of the first story of a forest on a permanent trial plot

Год учета	Состав, %	Число деревьев, тыс. экз./га	Средние			Сумма площадей сечения стволов, м ² /га	Относительная полнота	Запас стволовой древесины, м ³ /га
			возраст, лет	высота, м	диаметр ствола на высоте 1,3 м, см			
2008	69Б	0,21	105	30,9	38,3	24,18	0,70	316
	21Е	0,08	100	28,8	33,1	7,22	0,13	98
	10С	0,03	105	30,6	40,9	3,41	0,07	46
2018	63Б	0,17	115	33,1	43,1	25,87	0,71	339
	27Е	0,11	112	30,4	34,2	10,00	0,18	143
	10С	0,02	115	33,2	47,9	3,60	0,08	52

Условные обозначения: Б — береза повислая (*Betula pendula* Ehrh.), Е — ель европейская (*Picea abies* L.), С — сосна (*Pinus sylvestris* L.)

в среднеполнотном насаждении. Тип леса — березняк-кисличник, продуктивность березы соответствует Ia классу бонитета.

На ППП с интервалом 10 лет выполнен комплекс работ по установлению характеристик всех деревьев. Были измерены высота и диаметр стволов, параметры крон, определен возраст, установлено состояние каждого дерева ели. По состоянию деревья подразделяли на нормальные, ослабленные, сильно ослабленные, усыхающие, погибшие.

В первом ярусе древостоя доминирует береза, доля которой в составе за межучетный период вследствие отпада несколько уменьшилась (табл. 1). Абсолютная и относительная полноты, запас стволовой древесины березы практически не изменились, запас отпада компенсировался увеличением высоты и диаметра стволов.

Второе место в составе древостоя занимает ель. Ее возраст почти соответствует возрасту рубки для Московской обл. (101–120 лет). За 10-летний период ее доля возросла с 21 до 27 %, запас древесины увеличился в 1,5 раза, относительная полнота — в 1,4 раза. Третья порода в составе первого яруса — сосна, таксационные показатели которой за период наблюдений слабо изменились.

При обработке и анализе данных использованы статистические методы [27] и методы, описанные в ранее опубликованных работах [28–30].

Результаты и обсуждение

На процесс возобновления популяции ели под пологом березняков имеются различные точки зрения. В некоторых работах отмечается, что ель под пологом березняков возобновляется при достижении ими возраста 20–30 лет, что ограничивает возрастной диапазон популяции — около 30 лет [31–36]. Данные выводы основаны на исследованиях, которые не охватывают весь возрастной спектр березняков, в частности древостой

в возрасте, приближающемся к стадии распада. В березняках Подмосковья подрост ели под их пологом может быть представлен возрастным рядом от 3–5 до 50–60 лет [37].

Многолетними стационарными наблюдениями в режиме мониторинга на постоянных пробных площадях в южной тайге установлено, что возобновление подпологовой ели может проходить в ранние и поздние сроки. В первом случае формирование популяции происходит за счет особей, появившихся в березняках до 30–40-летнего возраста, во втором — ель появляется в более поздние сроки по причине отсутствия генеративных деревьев [30]. Кроме того установлено, что процесс возобновления ели не ограничивается одним периодом — в стадии старения березы под ее пологом появляется новая генерация ели [38].

В соответствии с полученными в ходе исследования результатами установлено, что объек-

Т а б л и ц а 2

Распределение деревьев ели по периодам возобновления в годы учета (%)

Distribution of spruce trees by periods of renewal in the years of accounting (%)

Период возобновления, лет	2008 г.	2018 г.
0–10	25,8	24,2
11–20	13,3	11,3
21–30	7,4	5,8
31–40	5,0	4,0
41–50	3,6	1,5
51–60	3,8	3,1
61–70	2,7	2,5
71–80	11,0	10,7
81–90	17,5	16,6
91–100	9,8	8,6
101–110	0,3	11,7
Итого	100	100

тивным показателем, характеризующим процесс возобновления подпологовой еловой популяции, является период возобновления — разница между средним возрастом березы и возрастом ели [29]. Этот показатель позволяет рассматривать совместно процесс формирования березняка и популяции ели. Изучаемые березняки относятся к объекту с ранним возобновлением. Здесь первая генерация ели появилась в первые 30 лет жизни березы. На нее приходится около 46 % численности ели, учтенной в 2008 г. (табл. 2).

В последующие 40 лет (31–70 лет) процесс возобновления как бы затухает. Однако это не означает, что в этот период появляется мало всходов. Испытывая сильную внутривидовую конкуренцию со стороны первой генерации ели, значительная часть появившихся всходов погибает. В течение последующих 30 лет (71–100) наблюдался второй пик возобновления, доля особей этого периода составила почти 38 %.

Через 10 лет (2018 г.) распределение деревьев ели по периодам возобновления не претерпело существенных изменений, только несколько уменьшились доли деревьев в каждом периоде. Это объясняется появлением третьей генерации ели с периодом возобновления 101–110 лет (см. табл. 2). Однако численность этой генерации составила только 109 шт./га. Сильная конкуренция со стороны двух предыдущих генераций обуславливает высокую вероятность отпада значительной ее части, поскольку 95 % числа особей отнесены к ослабленным и сильно ослабленным. Это подтверждается исследованиями в перестойных березняках южной тайги, где в семенной 2011 г. появилось 42 тыс. всходов на 1 га, однако в течение 3 лет значительная их часть погибла. Оставшиеся растения были отнесены к категории ослабленных [39].

Анализ процесса возобновления ели под пологом березняков свидетельствует о его волнообразном характере с периодичностью 30–40 лет в пределах возраста рассматриваемых березняков.

Период возобновления определяет возрастную структуру подпологовой популяции ели. В изучаемых березняках она характеризуется кривыми распределения с двумя пиками. В год закладки ППП это возрастные группы 11–30 и 81–100 лет (рис. 1). На долю таких деревьев приходится соответственно 31 и 35 % общей численности популяции, что в абсолютном выражении составляет 300 и 337 деревьев на 1 га (табл. 3).

Через 10 лет характер возрастного распределения деревьев ели почти не изменился, только кривые сместились на величину межмониторингового периода. Долевое участие доминирующих возрастных групп осталось на уровне первого учета — 2008 г. К изменениям в возрастной струк-

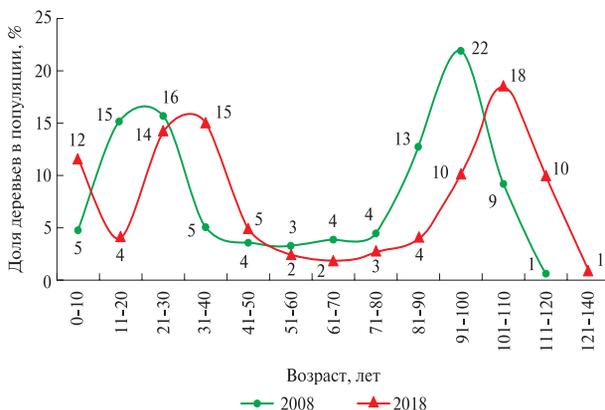


Рис. 1. Возрастное распределение деревьев ели под пологом перестойного березняка

Fig. 1. Age distribution of spruce trees under the canopy of overmature birch forest

Т а б л и ц а 3

Численность деревьев разного возраста по годам учета

The number of trees of different ages by years of accounting

Возрастная группа, лет	Число деревьев (шт./га ⁻¹) в году	
	2008	2018
0–10	46	109
11–20	147	37
21–30	153	132
31–40	49	141
41–50	35	46
51–60	32	23
61–70	37	17
71–80	43	26
81–90	124	37
91–100	213	95
101–110	89	173
111–120	6	92
121–130	–	9
Итого	973	939

туре популяции можно отнести некоторое снижение доли деревьев, имевших возраст в 2008 г. 91–100 лет, а также появление особей (12 % численности) возрастом менее 10 лет (см. рис. 1).

Оценка возрастной структуры по значению стандартного отклонения (*G*) показала, что формирующиеся под пологом перестойных березняков ельнички могут быть отнесены к условно одновозрастным (при учете 2008 г. — *G* = 28, при учете 2018 — *G* = 33) [40].

Вертикальная структура популяции ели в изучаемых березняках за годы проведения мониторингов существенно не изменилась. Доминируют (40 и 44 %) особи высотой 0,1–2,0 м (рис. 2). Их численность практически осталась на одном уровне — 389 и 409 шт./га (табл. 4).

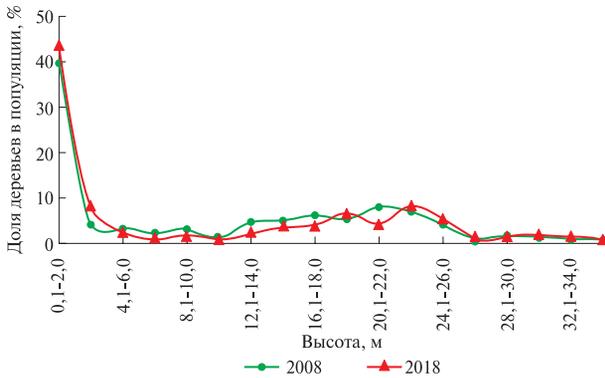


Рис. 2. Распределение деревьев ели по группам высот
Fig. 2. Distribution of spruce trees by height groups

Т а б л и ц а 4

Распределение числа деревьев ели по группам высот в годы учета

Distribution of the number of spruce trees by height groups in the years of accounting

Группа высот, м	Число деревьев (шт./га) в году	
	2008	2018
0,1-2,0	389	409
2,1-4,0	40	78
4,1-6,0	32	23
6,1-8,0	23	9
8,1-10,0	29	17
10,1-12,0	12	9
12,1-14,0	46	20
14,1-16,0	49	35
16,1-18,0	60	37
18,1-20,0	52	63
20,1-22,0	78	40
22,1-24,0	69	78
24,1-26,0	40	52
26,1-28,0	12	12
28,1-30,0	17	14
30,1-32,0	14	20
Более 32,0	12	23
Итого	973	939

За 10-летний период доля деревьев подроста увеличилась с 50 до 55 %, деревьев первого яруса — с 10 до 12 %. В первом случае такая динамика объясняется появлением новых особей ели, во втором — переходом деревьев второго яруса в первый. В отличие от этих элементов древостоя во втором ярусе (деревья высотой 8,1–24,0 м) наблюдалось уменьшение численности деревьев с 395 до 300 шт./га (см. табл. 4). Это с одной стороны, как было показано выше, связано с переходом части деревьев в первый ярус, с другой – с отпадом существенной части таких деревьев. Следует отметить, что за межмониторинговый период в общей численности отпада в популяции на долю деревьев второго яруса приходится 46 %.

Таким образом, численность деревьев первого и второго ярусов (деревья высотой более 8 м), являющихся основой формирующегося под пологом березы ельника, к 115 годам (учет 2018 г.) составляет 420 шт./га. Это значение на 20 % меньше, чем численность ели в нормальном древостое ели IV класса бонитета, полнота которого приведена к суммарной полноте первого и второго ярусов ели (0,50) в изучаемых насаждениях.

К одной из важных характеристик древостоев, определяющих перспективность, относится их состояние. Анализ состояния растущих деревьев в годы наблюдений показал, что в подпологовой популяции ели преобладали ослабленные особи (категория 2), доля которых составила 48 % в год закладки ППП (2008 г.) и 43 % спустя 10 лет (рис. 3). Среди деревьев второго яруса эти значения соответственно составляют 56 и 61 %, среди деревьев подроста — 49 и 41 %.

Доминирование в популяции ослабленных деревьев предопределило категорию состояния (K_C), которая была рассчитана по представленности растущих деревьев разного состояния. За 10-летний период в целом для популяции значение K_C практически не изменилось ($K_C = 2,0$ в 2008 г., $K_C = 2,1$ в 2018 г.), т. е. состояние популяции можно характеризовать как ослабленное.

Анализ состояния деревьев в разных ярусах древостоя показал следующее. Первый ярус, как в год закладки, так и спустя 10 лет, составляют здоровые особи. Состояние деревьев второго яруса сначала характеризовалось как сильно ослабленное ($K_C = 2,7$). Через 10 лет состояние улучшилось до ослабленного ($K_C = 2,0$), что является следствием отпада части сильно ослабленных деревьев (21 % числа деревьев при первом учете). Состояние деревьев подроста за межмониторинговый период почти не изменилось ($K_C = 2,3-2,4$) и характеризовалось как ослабленное.

Относительным постоянством состояния в течение 10 лет отличаются деревья с определенным периодом возобновления. По значению K_C можно выделить деревья с периодом возобновления до 30 лет ($K_C = 1,7$). Для поколений ели, возобновившихся в более поздние сроки, значения K_C оставались в пределах 2,3–2,5. Ухудшение состояния деревьев с увеличением периода возобновления, как уже отмечалось, объясняется внутривидовой конкуренцией со стороны поколения ели, возобновившегося в первые 20–30 лет после рубки древостоя.

В результате проведенных работ была получена 10-летняя динамика таксационных показателей подпологовой популяции ели. В изучаемых березняках в этот период наблюдается уменьшение общей численности деревьев ели, что связано главным образом с отпадом деревьев второго яруса. За счет изменения статуса небольшого

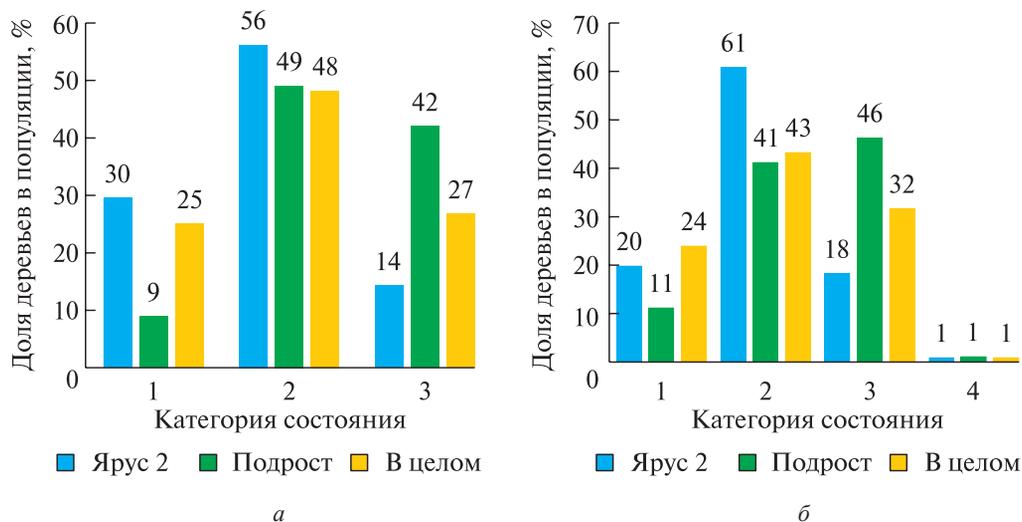


Рис. 3. Распределение деревьев ели по состоянию в год закладки постоянной пробной площади (а) и через 10 лет (б)
Fig. 3. Distribution of spruce trees as of the year of establishment of the permanent trial plot (a) and 10 years later (b)

Т а б л и ц а 5

Таксационная характеристика подпологовой популяции ели

Taxation characteristics of the sub-covered spruce population

Год учета	Ярус	Число деревьев, тыс. экз./га	Средние			Сумма площадей сечения стволов, м ² /га	Относительная полнота	Запас стволовой древесины, м ³ /га
			возраст, лет	высота, м	диаметр ствола на высоте 1,3 м, см			
2008	1	0,08	100	28,8	33,1	7,22	0,13	98
	2	0,54	88	16,8	18,7	14,80	0,45	122
	Подрост	0,54	28	1,8	—	—	—	—
2018	1	0,11	112	30,4	34,2	10,00	0,18	143
	2	0,31	100	18,7	21,3	11,18	0,32	102
	Подрост	0,52	28	1,5	—	—	—	—

числа деревьев этого яруса происходит увеличение числа деревьев первого яруса. Численность подроста практически осталась без изменения. В этой части популяции отпад компенсировался появлением нового поколения ели (табл. 5).

Уменьшение численности деревьев ели второго яруса, несмотря на увеличение среднего значения диаметра стволов, приводит к некоторому снижению суммарных абсолютной и относительной полноты ели первого и второго ярусов — с 0,58 до 0,50. В результате происходящих процессов к возрасту 115 лет запас стволовой древесины первого и второго ярусов ели составил 245 м³/га (2018), что на 25 м³/га больше, чем в возрасте 105 лет (2008). Учитывая динамику состояния деревьев (увеличение доли ослабленных и сильно ослабленных во втором ярусе), их возраст (равен возрасту количественной спелости ели III класса бонитета), а также изменения в вертикальной структуре дре-

востоя (отсутствие переходов деревьев из подроста во второй ярус), в перспективе можно ожидать дальнейшего снижения суммарной численности и полноты первого и второго ярусов. В результате такой динамики после распада березняков могут сформироваться низкополнотные ельники, что подтверждают результаты ранее выполненных исследований в южной тайге и в смешанных лесах Русской равнины [20, 29].

Выводы

Исследованиями популяции ели, развивающейся под пологом перестойных березняков, установлено следующее. В зоне смешанных лесов основу формирующихся ельников часто составляют деревья с периодом возобновления менее 30 лет, которые к наступлению распада березняков образуют первый и второй ярусы со средним возрастом, приближающимся к возрасту

количественной спелости (100 лет). Возрастная структура популяции ели в березняках возрастом 115 лет характеризуется доминированием деревьев двух возрастных групп — 21–40 и 91–120 лет, на долю которых приходится соответственно 29 и 37 % численности популяции. Ельники под пологом перестойных березняков относятся к условно одновозрастным древостоям.

Вертикальная структура еловой популяции за рассматриваемый 10-летний период не претерпела существенных изменений. Доминируют (40–44 %) особи высотой до 2,0 м. Незначительно увеличилась доля деревьев подроста и первого яруса (соответственно на 6 % и 3 %), представленность деревьев второго яруса уменьшилась на 9 %.

Состояние подпологовой популяции ели в перестойных березняках характеризуется как ослабленное. Наилучшим состоянием отличаются деревья первого яруса (категория состояния $K_C = 1$). Состояние деревьев подроста за период наблюдений не изменялось, оставаясь ослабленным ($K_C = 2,3–2,4$). Положительной динамикой характеризовалась совокупность деревьев второго яруса — из категории сильно ослабленных ($K_C = 2,7$) она за счет отпада перешла в категорию ослабленных ($K_C = 2,0$). Лучшим состоянием отличаются деревья с периодом возобновления до 30 лет.

В популяции ели, развивающейся под пологом перестойных березняков, наблюдается уменьшение суммарной численности и относительной полноты деревьев ели первого и второго ярусов. Результат этого процесса после распада производных березняков — формирование низкополнотных ельников продуктивностью, соответствующей III классу бонитета, что существенно меньше для рассматриваемых условий местопроизрастания (I класс бонитета) региона исследований.

Список литературы

- [1] Чупров Н.П. О роли подроста ели в формировании елово-березовых насаждений // Лесное хозяйство, 1963. № 5. С. 7–9.
- [2] Чупров Н.П. Влияние некоторых факторов на рост ели предварительного возобновления // Лесное хозяйство, 1967. № 8. С. 17–20.
- [3] Чертовской В.Г., Мелехов И.С., Крылов Г.В. Таежное лесоводство. М.: Лесная пром-сть, 1974. 232 с.
- [4] Мелехов И. С. Лесоведение. М.: Лесная пром-сть, 1980. 408 с.
- [5] Побединский А.В. Рубки главного пользования. М.: Лесная пром-сть, 1980. 192 с.
- [6] Бугаев В.А., Гладышева Н.В. Об особенностях роста ели под пологом лиственных пород // Лесное хозяйство, 1982. № 4. С. 19–21.
- [7] Орлов А.Я. Почвенно-экологические основы лесоводства в южной тайге. М.: Наука, 1991. 104 с.
- [8] Сеннов С.Н. Динамика еловых древостоев разного происхождения. // Лесоведение, 1992. № 1. С. 3–10.
- [9] Рубцов М.В., Дерюгин А.А., Никитин А.П. Возрастная структура популяции ели под пологом березняков южной тайги // Лесоведение, 2000. № 4. С. 28–34.
- [10] Дебков Н.М. Количественные и качественные параметры возобновления под пологом древостоев, сформировавшихся из предварительных генераций // ИВУЗ Лесной журнал, 2015. № 1/343. С. 35–44.
- [11] Григорьева А.А. Оценка состояния подроста ели под пологом древостоев в разных типах леса // Известия СПбГЛУ, 2008. № 183. С. 7–13.
- [12] Беляева Н.В. Оценка жизненного состояния популяций подроста ели на парцеллярном уровне // Актуальные проблемы лесного комплекса, 2013. № 35. С. 38–41.
- [13] Теринов Н.Н. Метод формирования темнохвойных насаждений // Тр. СПб НИИ лесного хозяйства, 2013. Вып. 1. С. 64–71.
- [14] Рубцов М.В., Дерюгин А.А. Динамика возрастной структуры популяции ели под пологом южно-таежных березняков Русской равнины // Хвойные бореальной зоны, 2013. Т. XXXI. № 1–2. С. 9–14.
- [15] Дебков Н.М., Грязькин А.В., Ковалев Н.В. Состояние предварительного возобновления под пологом березняков в средней тайге в условиях Томской области // Леса России и хозяйство в них, 2015. № 1 (51). С. 24–32.
- [16] Зарубина Л.В. Состояние естественного возобновления ели в мелколиственных лесах на Севере России // ИВУЗ Лесной журнал, 2016. № 3. С. 52–65.
- [17] Дебков Н.М., Булатова А.А. Особенности возобновления под пологом березняков южной тайги Томской области // Леса России и хозяйство в них, 2016. № 1 (56). С. 17–24.
- [18] Матвеева А.С., Беляева Н.В., Данилов Д.А. Структура подроста ели разных фенологических форм по высоте в зависимости от состава и строения древостоя в различных типах леса // Лесотехнический журнал, 2017. Т. 7. № 3 (27). С. 115–129.
- [19] Теринов Н.Н., Андреева Е.М., Залесов С.В., Луганский Н.А. Восстановление еловых лесов: теория, отечественный опыт и методы решения // ИВУЗ Лесной журнал, 2020. № 3 (375). С. 9–23.
- [20] Дерюгин А.А., Глазунов Ю.Б. Об оценке перспективности подроста ели под пологом березняков южной тайги // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 4. С. 12–18. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-4-12-18.
- [21] Gadov K. Waldstruktur und Wachstum. Universitätsdrucke Göttingen, 2003. 241 p.
- [22] Kuusela K. The dynamics of Boreal Forests, 1990, sitra 112, 172 p.
- [23] Lundqvist L., Fridman E. Influence of local stand basal area on density and growth of regeneration in uneven-aged Picea abies stands // Scand J. For Res, 1996, v. 11, pp. 364–369.
- [24] Lundqvist L., Nilson K. Regeneration dynamics in an uneven-aged virgin Norway spruce forest in northern Sweden // Scand J. For Res., 2007, v. 22, pp. 304–309.
- [25] Majasalmi T., Rautiainen M. The impact of tree canopy structure on understorey variation in a boreal forest // Forest ecology and management, 2020, v. 466, p. 118100.
- [26] Pukkala T., Lähde E., Laiho O. Species interactions in even- and uneven-aged boreal forests. J Sust For, 2013, v. 32, p. 1–33.
- [27] Лакин Г.Ф. Биометрия. М.: Высшая школа, 1980. 293 с.
- [28] Рубцов М.В., Дерюгин А.А. Возрастная динамика морфоструктуры и рост популяции ели под пологом березняков южной тайги // Идеи биогеоценологии в лесоведении и лесоразведении. М.: Наука, 2006. С. 63–81.
- [29] Рубцов М.В., Дерюгин А.А. Возрастная динамика морфоструктуры и состояния популяции ели под пологом южнотаежных березняков // Комплексные стационарные исследования в лесах южной тайги (Памяти М.В. Рубцова). М.: Товарищество научных изданий КМК, 2017. С. 125–153.
- [30] Рубцов М.В., Дерюгин А.А. Восстановительно-возрастная динамика популяции ели под пологом южно-таежных березняков при демулационном процессе // Продукционный процесс и структура лесных биогеоце-

- нозов: теория и эксперимент (Памяти А.И. Уткина). М.: Товарищество научных изданий КМК, 2009. С. 206–228.
- [31] Белов С.В. Лесоводство. М.: Лесная пром-сть, 1983. 352 с.
- [32] Чупров Н.П. Зональные особенности возрастной структуры березово-еловых древостоев Европейского Севера // Лесоведение, 1988. № 3. С. 11–20.
- [33] Яковлев Г.В. Особенности последующего возобновления ели в подзоне южной тайги // Возобновление и формирование лесов на вырубках. М.: ВНИИЛМ, 1975. С. 120–130.
- [34] Яруткин И.А. Оптимальный возраст лиственных древостоев для возобновления ели обыкновенной в подзоне хвойно-широколиственных лесов // Вопросы повышения продуктивности лесов. Йошкар-Ола: Марийское книжное изд-во, 1976. С. 10–13.
- [35] Кравчинский Д.М. О последствиях сплошных рубок в еловых и лиственных лесах средней и северной тайги. СПб: Типография П.П. Сойкина, 1901. 31 с.
- [36] Кайрюкшис Л. Формирование елово-лиственных молодняков. Каунас: Литовский научно-исследовательский ин-т лесного хозяйства, 1959. 245 с.
- [37] Алексеев В.И. Возобновление ели на вырубках. М.: Наука, 1978. 130 с.
- [38] Дерюгин А.А., Глазунов Ю.Б. Сравнительный анализ структуры подпологовых популяций ели в березняках южной тайги и смешанных лесов Русской равнины // Лесохозяйственная информация, 2019. № 2. С. 15–24.
- [39] Татарников Д.В. Текущее возобновление в ходе демультипликативных сукцессий в южной тайге // Комплексные стационарные исследования в лесах южной тайги (Памяти М.В. Рубцова). М.: Товарищество научных изданий КМК, 2017. С. 188–208.
- [40] Лебков В.Ф. Дендрометрические основы структурно-динамической организации древесных ценозов сосны: дис. ... д-ра биол. наук; 06.03.03. М.: Ин-т лесоведения РАН, 1992. 43 с.

Сведения об авторах

Дерюгин Анатолий Александрович — канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр. лаборатории лесоводства и биологической продуктивности, Институт лесоведения РАН, da45@mail.ru

Глазунов Юрий Борисович — канд. с.-х. наук, зав. лабораторией лесоводства и биологической продуктивности, Институт лесоведения РАН, root@ilan.ras.ru

Львов Юрий Георгиевич — инженер-исследователь, Институт лесоведения РАН, root@ilan.ras.ru

Поступила в редакцию 29.11.2021.

Одобрено после рецензирования 27.01.2022.

Принята к публикации 04.04.2022.

SPRUCE POPULATION UNDER THE CANOPY OF OVERMATURE BIRCH FORESTS IN THE MIXED FOREST ZONE OF THE EUROPEAN PART OF RUSSIA

A.A. Deryugin, Yu.B. Glazunov, Yu.G. L'vov

Institute of Forest Science RAS, 21, Sovetskaya st., village Uspenskoe, Odintsovo district, 143030, Moscow reg., Russia

root@ilan.ras.ru

The results of studies of the under-canopy population of spruce (*Picea abies* L.) in over-mature birch forests (*Betuletum oxalidosum*) of the Moscow region are presented. The purpose of the research was to study of the renewal process periodicity, age, vertical structure and condition of the spruce population. The work was carried out on a permanent trial plot in the period 2008–2018. The undulating feature of the spruce renewal process under the canopy of birch forest with a frequency of 30–40 years within the age of the birch trees under consideration has been established. It is determined that the basis of spruce forests formed under the canopy are trees with a renewal period of less than 30 years, which by the onset of the decay of birch forests form the first and second layers with an average age approaching the age of quantitative maturity. The age structure of the spruce population in birch forests aged 115 years is characterized by the dominance of trees of two age groups — 21–40 and 91–120 years, which account for 29 % and 37 % of the population, respectively. The emerging spruce forests belong to conditionally even-aged stands. Trees with a height of 2,0 m dominate (about 40 %) in the vertical structure of the population. The age dynamics of the stand is aimed at a slight increase in undergrowth trees and the first storey, and a decrease in the number of the second storey trees occurs. This is due to the emergence of new spruce specimens and the transition of part of the trees of the second storey to the first one. It was found that weakened trees predominate in the under-canopy population of spruce in overmature birch forests. Trees of the first layer are in the best condition (status category $C_s = 1$). The state of undergrowth trees during the observation period did not change, remaining weakened ($C_s = 2,3–2,4$). The set of trees of the second layer was characterized by positive dynamics — from the category of strongly weakened ($C_s = 2,7$), due to the mortality, it moved to the category of weakened ($C_s = 2,0$). Trees with a renewal period of up to 30 years are in the best condition. As a result of the succession process, after the decay of birch forests, low-density spruce forests with a productivity corresponding to the III site class will be formed.

Keywords: over-mature birch forests, spruce under the canopy, age and vertical structures, condition, mixed forests

Suggested citation: Deryugin A.A., Glazunov Yu.B., L'vov Yu.G. *Populyatsiya eli pod pologom perestoynykh bereznyakov v zone smeshannykh lesov evropeyskoy chasti Rossii* [Spruce population under the canopy of overmature birch forests in the mixed forest zone of the european part of Russia]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 3, pp. 5–13. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-5-13

References

- [1] Chuprov N.P. *O roli podrosta eli v formirovaniy elovo-berezovykh nasazhdeniy* [On the role of spruce undergrowth in the formation of spruce-birch forests]. *Lesnoe khozyaistvo* [Forestry], 1963, no. 5, pp. 7–9.
- [2] Chuprov N.P. *Vliyaniye nekotorykh faktorov na rost eli predvaritel'nogo vozobnovleniya* [The influence of some factors on the growth of spruce of preliminary regeneration]. *Lesnoe khozyaistvo* [Forestry], 1967, no. 8, pp. 17–20.
- [3] Chertovskoi V.G., Melekhov I.S., Krylov G.V. i dr. *Taehnoe lesovodstvo* [Taiga silviculture]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest industry], 1974, 232 p.
- [4] Melekhov I.S. *Lesovedeniye* [Forest science]. Moscow: Lesnaya promyshlennost'. 1980. 408 s.
- [5] Pobedinskii A.V. *Rubki glavnogo pol'zovaniya* [Principal felling]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest industry], 1980, 192 p.
- [6] Bugaev V.A., Gladysheva N.V. *Ob osobennostyakh rosta eli pod pologom listvennykh porod* [On the features of the growth of spruce under the canopy of deciduous species]. *Lesnoe khozyaistvo* [Forestry], 1982, no. 4, pp. 19–21.
- [7] Orlov A.Ya. *Pochvenno-ekologicheskie osnovy lesovodstva v yuzhnoi taiga* [Soil and ecological foundations of forestry in the southern taiga]. Moscow: Nauka [Science], 1991, 104 p.
- [8] Sennov S.N. *Dinamika elovykh drevostoev raznogo proiskhozhdeniya* [Dynamics of spruce stands of different origins]. *Lesovedeniye* [Forest science], 1992, no. 1, pp. 3–10.
- [9] Rubtsov M.V., Deryugin A.A., Nikitin A.P. *Vozrastnaya struktura populyatsii eli pod pologom bereznyakov yuzhnoi taigi* [Age structure of the spruce population under the canopy of birch forests of the southern taiga]. *Lesovedeniye* [Forest science], 2000, no. 4, pp. 28–34.
- [10] Debkov N.M. *Kolichestvennye i kachestvennye parametry vozobnovleniya pod pologom drevostoev, sformirovavshikhysya iz predvaritel'nykh generatsiy* [Quantitative and qualitative parameters of renewal under the canopy of stands formed from preliminary generations]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2015, no. 1/343, pp. 35–44.
- [11] Grigor'eva A.A. *Otsenka sostoyaniya podrosta eli pod pologom drevostoev v raznykh tipakh lesa* [Assessment of the spruce undergrowth condition under the canopy of stands in different forest types]. *Izvestiya SPbGLU*, 2008, no. 183, pp. 7–13.
- [12] Belyaeva N.V. *Otsenka zhiznennogo sostoyaniya populyatsii podrosta eli na partsellyarnom urovne* [Assessment of the spruce undergrowth populations vital state at the parcel level]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex], 2013, no. 35, pp. 38–41.
- [13] Terinov N.N. *Metod formirovaniya temnokhvoynykh nasazhdeniy* [The method of forming dark coniferous plantations]. *Proceedings of St. Petersburg Research Institute of Forestry*, 2013, v. 1, pp. 64–71.
- [14] Rubtsov M.V., Deryugin A.A. *Dinamika vozrastnoi struktury populyatsii eli pod pologom yuzhno-taehnykh bereznyakov Russkoi ravniny* [Dynamics of the spruce population age structure under the canopy of the southern taiga birch forests of the Russian Plain]. *Khvoynye boreal'noi zony* [Coniferous boreal zone], 2013, t. XXXI, no. 1–2, pp. 9–14.
- [15] Debkov N.M., Gryaz'kin A.V., Kovalev N.V. *Sostoyaniye predvaritel'nogo vozobnovleniya pod pologom bereznyakov srednei taigi v usloviyakh Tomskoi oblasti* [The state of preliminary renewal under the canopy of middle taiga birch forests in the conditions of the Tomsk region / Forests of Russia and the economy in them]. *Lesa Rossii i khozyaistvo v nikh* [Forests of Russia and the economy in them], 2015, no. 1 (51), pp. 24–32.
- [16] Zarubina L.V. *Sostoyaniye estestvennogo vozobnovleniya eli v melkolistvennykh lesakh na Severe Rossii* [The state of spruce natural regeneration in small-leaved forests in the North of Russia]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2016, no. 3, pp. 52–65.
- [17] Debkov N.M., Bulatova A.A. *Osobennosti vozobnovleniya pod pologom bereznyakov yuzhnoi taigi Tomskoi oblasti* [Features of renewal under the canopy of birch forests in the Tomsk region southern taiga]. *Lesa Rossii i khozyaistvo v nikh* [Forests of Russia and the economy in them], 2016, no. 1 (56), pp. 17–24.
- [18] Matveeva A.S., Belyaeva N.V., Danilov D.A. *Struktura podrosta eli raznykh fenologicheskikh form po vysote v zavisimosti ot sostava i stroeniya drevostoya v razlichnykh tipakh lesa* [The structure of different phenological forms spruce undergrowth heights depending on the composition and structure of the stand in different types of forest]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2017, t. 7, no. 3 (27), pp. 115–129.
- [19] Terinov N.N., Andreeva E.M., Zalesov S.V., Luganskii N.A. i dr. *Vosstanovleniye elovykh lesov: teoriya, otechestvennyi opyt i metody resheniya* [Restoration of spruce forests: theory, native experience and methods of solution]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2020, no. 3 (375), pp. 9–23.
- [20] Deryugin A.A., Glasunov Yu.B. *Ob otsenke perspektivnosti podrosta eli pod pologom bereznyakov yuzhnoi taygi* [Prospect assessment of undergrowth spruce under canopy of birch forests in southern taiga]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 4, pp. 12–18. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-4-12-18
- [21] Gadow K. *Waldstruktur und Wachstum*. Universitätsdrucke Göttingen, 2003. 241 p.
- [22] Kuusela K. *The dynamics of Boreal Forests*, 1990, sitra 112, 172 p.
- [23] Lundqvist L., Fridman E. *Influence of local stand basal area on density and growth of regeneration in uneven-aged Picea abies stands*. *Scand J. For Res*, 1996, v. 11, pp. 364–369.
- [24] Lundqvist L., Nilson K. *Regeneration dynamics in an uneven-aged virgin Norway spruce forest in northern Sweden*. *Scand J. For Res.*, 2007, v. 22, pp. 304–309.
- [25] Majasalmi T., Rautiainen M. *The impact of tree canopy structure on understory variation in a boreal forest*. *Forest ecology and management*, 2020, v. 466, p. 118100.
- [26] Pukkala T., Lähde E., Laiho O. *Species interactions in even- and unevenaged boreal forests*. *J Sust For*, 2013, v. 32, p. 1–33.
- [27] Lakin G.F. *Biometriya* [Biometrics]. Moscow: Vysshaya shkola [Higher school], 1980, 293 p.
- [28] Rubtsov M.V., Deryugin A.A. *Vozrastnaya dinamika morfostruktury i rost populyatsii eli pod pologom bereznyakov yuzhnoi taigi* [Age dynamics of morphostructure and growth of the spruce population under the canopy of birch forests of the southern taiga]. *Idei biogeotsenologii v lesovedenii i lesorazvedenii* [Ideas of Biogeocenology in Forest Science and Forest Breeding]. Moscow: Nauka, 2006, pp. 63–81.

- [29] Rubtsov M.V., Deryugin A.A. *Vozrastnaya dinamika morfostruktury i sostoyaniya populyatsii eli pod pologom yuzhnotaezhnykh bereznyakov* [Age dynamics of the morphostructure and state of the spruce population under the canopy of southern taiga birch forests]. Kompleksnye statsionarnye issledovaniya v lesakh yuzhnoi taigi (Pamyati M.V. Rubtsova) [Complex stationary studies in the forests of the southern taiga (In memory of M.V. Rubtsova)]. Moscow: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2017, pp. 125–153.
- [30] Rubtsov M.V., Deryugin A.A. *Vosstanovitel'no-voznrastnaya dinamika populyatsii eli pod pologom yuzhno-taezhnykh bereznyakov pri demutatsionnom protsesse* [Recovery-age dynamics of the spruce population under the canopy of southern taiga birch forests during the demutation process]. Produktionnyi protsess i struktura lesnykh biogeotsenozov: teoriya i eksperiment (Pamyati A.I. Utkina) [Production process and structure of forest biogeocenoses: theory and experiment (In memory of A.I. Utkina)]. Moscow: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2009, pp. 206–228.
- [31] Belov S.V. *Lesovodstvo* [Silviculture]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest industry], 1983, 352 p.
- [32] Chuprov N.P. *Zonal'nye osobennosti vozrastnoi struktury berezovo-elovykh drevostoev Evropeiskogo Severa* [Zonal features of the birch-spruce stands age structure of the European North]. Lesovedenie [Forest science], 1988, no. 3, pp. 11–20.
- [33] Yakovlev G.V. *Osobennosti posleduyushchego vozobnovleniya eli v podzone yuzhnoi taigi* [Features of the spruce renewal after felling of the main crop in the southern taiga subzone]. Vozobnovlenie i formirovanie lesov na vyrubkakh [Renewal and formation of forests in clearings]. Moscow: VNIILM, 1975, pp. 120–130.
- [34] Yartukin I.A. *Optimal'nyi vozrast listvennykh drevostoev dlya vozobnovleniya eli obyknovvennoi v podzone khvoino-shirokolistvennykh lesov* [The optimal age of deciduous stands for the Norway spruce renewal in the subzone of coniferous-deciduous forests]. Voprosy povysheniya produktivnosti lesov [Problems of increasing the productivity of forests]. Ioshkar-Ola: Mariiskoe kn. izd-vo, 1976, pp. 10–13.
- [35] Kravchinskii D.M. *O posledstviyakh sploshnykh rubok v elovykh i listvennykh lesakh srednei i severnoi taigi* [On the consequences of clearcuts in spruce and deciduous forests of the middle and northern taiga]. St. Petersburg: P.P. Soykina, 1901, 31 p.
- [36] Kairyukshtis L. *Formirovanie elovo-listvennykh molodnyakov* [Formation of spruce-deciduous young stands]. Kaunas: Lit. nauchno-issledovatel'skii in-t lesnogo khozyaistva [Lithuanian Research Institute of Forestry], 1959, 245 p.
- [37] Alekseev V.I. *Vozobnovlenie eli na vyrubkakh* [Regeneration of spruce in felling areas]. Moscow: Nauka [Science], 1978, 130 p.
- [38] Deryugin A.A., Glazunov Yu.B. *Sravnitel'nyi analiz struktury podpologovykh populyatsii eli v bereznyakh yuzhnoi taigi i smeshannykh lesov Russkoi ravniny* [Comparative analysis of the under-canopy spruce populations structure in birch forests of the southern taiga and mixed forests of the Russian Plain]. Lesokhozyaystvennaya informatsiya [Forestry Information], 2019, no. 2, pp. 15–24.
- [39] Tatarnikov D.V. *Tekushchee vozobnovlenie v khode demutatsionnykh suksessii v yuzhnoi taige* [Current renewal during demutational successions in the southern taiga]. Kompleksnye statsionarnye issledovaniya v lesakh yuzhnoi taigi (Pamyati M.V. Rubtsova) [Comprehensive stationary research in the forests of the southern taiga (In memory of M.V. Rubtsov)]. Moscow: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2017, pp.188–208.
- [40] Lebkov V.F. *Dendrometricheskie osnovy strukturno-dinamicheskoi organizatsii drevesnykh tsenozov sosny* [Dendrometric foundations of the structural-dynamic organization of pine tree cenoses]. Dis. ... Dr. Sci. (Biol.). Moscow: Institute of Forest Science RAN, 1992, 43 p.

Authors' information

Deryugin Anatoliy Aleksandrovich — Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, Institut of Forest Science, da45@mail.ru

Glazunov Yuriy Borisovich — Cand. Sci. (Agriculture), Head of the Laboratory of Forestry and Biological productivity, Institut of Forest Science, root@ilan.ras.ru

L'vov Yuriy Georgievich — Research Engineer, Institut of Forest Science, root@ilan.ras.ru

Received 29.11.2021.

Approved after review 27.01.2022.

Accepted for publication 04.04.2022.

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

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ ГЕНЕТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ СУБПОПУЛЯЦИЙ ДУБА ЧЕРЕШЧАТОГО И СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ МАЛЫХ ДОЗ РАДИАЦИИ

В.А. Сиволапов, Л.А. Логинова, Е.А. Воробьева,
В.Н. Вепринцев[✉], С.В. Щетинкин

ФБУ «Рослесозащита» — «ЦЗЛ Воронежской области», 394000, г. Воронеж, ул. Ломоносова, д. 105

vprintsevvn@rcfh.ru

Рассмотрена вероятность возникновения популяционно-значимых изменений генома в результате длительного воздействия повышенного радиационного фона среды обитания основных лесобразующих пород. Размер загрязнения на стационарных участках соотнесен с уровнем гетерозиготности выборок сосны и дуба.

Ключевые слова: радиоактивное загрязнение, сосна, дуб, радиационное воздействие, ПЦР, ДНК, гетерозиготность

Ссылка для цитирования: Сиволапов В.А., Логинова Л.А., Воробьева Е.А., Вепринцев В.Н., Щетинкин С.В. Оценка изменений генетической структуры субпопуляций дуба черешчатого и сосны обыкновенной в условиях длительного воздействия малых доз радиации // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 3. С. 14–20. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-14-20

Еще в XIX в. было обнаружено, что рентгеновские лучи вызывают повышенную частоту появления мутантных потомков у насекомых, родителей которых подвергали облучению, и сформулированы некоторые общие принципы действия радиации на живые системы. Принцип отсутствия пороговой дозы свидетельствует о том, что абсолютно безопасных для живых организмов доз излучения не существует и любое радиационное воздействие может вызвать генетические изменения у потомков облученного родителя. Суть принципа «накопления дозы» состоит в том, что дозы, полученные организмом в течение жизни аккумулируются, поэтому чем больше продолжительность жизни, тем более вероятны последствия как для организма, так и для его потомства. Принцип удваивающей дозы введен для сопоставления относительного эффекта генетических нарушений, возникших в результате естественного мутационного процесса и индуцированного радиационным воздействием. Так, для растений количество энергии, необходимое для удвоения количества мутаций по сравнению с естественным уровнем мутирования, лежит в широком диапазоне — 8...390 рад [1].

После открытия повреждающего действия ионизирующих излучений, выражающегося в гибели клеток различных тканей, или всего организма было обнаружено, что величины доз, приводящие к летальным эффектам, различаются в широких пределах, порой на несколько порядков. Другими словами, каждому биологическому

объекту свойственна своя мера восприимчивости к воздействию ионизирующей радиации, т. е. видовая радиочувствительность.

Радиочувствительность может сильно варьировать даже в пределах одного вида и определяется понятием «индивидуальная радиочувствительность» [2].

Среди прочих радиоактивных изотопов, длительно присутствующих в местах загрязнения после произошедших на объектах атомного профиля аварий, особому учету подлежат цезий-137 и стронций-90. Являясь, с точки зрения метаболических путей химическими аналогами калия и кальция, они представляют опасность для млекопитающих, в том числе для человека [3].

Радионуклиды (цезий-137, стронций-90) в дерново-подзолистых, оподзоленных супесчанно-песчаных (в меньшей степени суглинистых) почвах мигрируют ежегодно в более глубокие горизонты, попадая рано или поздно в корнеобитаемые слои почвы. Здесь они захватываются корневой системой растений и вновь выносятся растениями на поверхность. Поэтому поверхность почв на некоторое время в местах загрязнений ставшая менее радиоактивной, оказывается со временем более радиоактивной (за счет листового опада и пр.). Скорость вертикальной миграции различна для разных радионуклидов, видов растений и гранулометрического состава почв. Коэффициент перехода может отличаться на порядки [4].

В 2016 г. Научный комитет ООН по действию атомной радиации оценил эффекты радиационного воздействия на растения и животных и

обнаружил, что гипотетический диапазон доз облучения 1...10 Гр вряд ли приведет к эффектам в популяциях животных и растений, однако индивидуальные реакции на радиационное воздействие варьируют. Когда уровни радиационного воздействия являются низкими или очень низкими, что более характерно для среднего радиационного воздействия, возникновение отдаленных эффектов не подтверждается, с учетом статистических и других неопределенностей. Тем не менее вследствие возможных индивидуальных реакции организмов подобные эффекты нельзя исключать [5]. Исследования динамики изменения биометрических показателей древесных видов указывают на пропорциональный характер воздействия радиации [6]. Известно, что хвойные деревья более чувствительны и заметно дольше восстанавливаются после радиационного воздействия, чем лиственные, в том числе по причине отсутствия у первых сезонного листопада и возможности быстро избавиться от зараженной биомассы.

На молекулярном уровне ионизирующее излучение может приводить к одно- и двуцепочечным разрывам ДНК, а также сшивкам между азотистыми основаниями, белками матрикса и гистонами [7]. Подобные процессы по своей природе носят случайный характер локализации и выше упомянутые перестройки имеют место как в интронной, так и в экзонной (значимой) части генома.

Перестройки, сопровождающиеся перемещением только поврежденных участков хромосом, когда весь генетический материал остается связанным с центромерой и может равномерно распределяться между дочерними клетками, относятся к стабильным, так как они могут передавать генетический материал из поколения в поколение, сохраняясь в организме в течение многих лет. Примером могут служить транслокации, при которых участок генома перемещается в новое для него место в молекуле ДНК, но продолжает функционировать [2].

Такая хромосомная аберрация, как потеря гетерозиготности генов-супрессоров опухолевого роста, часто приводит к онкологии у млекопитающих [8]. Для сосны повышенная частота хромосомных аберраций также свойственна фенотипически мутантным формам. Причины подобных нарушений связывают преимущественно со стрессовыми условиями или длительным воздействием неблагоприятных факторов окружающей среды. К ним можно отнести и облучение в местах радиационного загрязнения. Сосна обыкновенная в силу высокой видовой адаптивности может служить, таким образом, цитогенетическим маркером экстремальности условий среды обитания [9].

Защитные механизмы, имеющиеся в арсенале клеток, позволяют в некоторых случаях противостоять негативным факторам среды, непосредственно воздействующим на геном, в частности, наличие различных систем репарации ДНК [10]. Большим числом работ с применением радиобиологических исследований показано, что создание условий для возможности восстановления поврежденной структуры ДНК после воздействия гамма- или рентгеновского излучения, приводит к значительному увеличению доли выживших клеток. Это явление, обусловленное созданием условий для активизации ферментативных систем репарации и увеличением времени восстановления структур ДНК до начала синтеза и вступления клеток в митоз, было названо восстановлением потенциально летальных повреждений. В зависимости от условий скорость восстановления определяется характеристическим промежутком времени — от 1 до 10 ч [2].

В отличие от морфологических аномалий, ростовых показателей и уровня выживаемости сохранившиеся генетические мутации носят зачастую скрытый характер, проявляют себя не в первом поколении и накапливаются со временем.

Степень гетерозиготности, как известно, является хорошей предпосылкой генетической изменчивости и, в свою очередь, обуславливает потенциал адаптации. Адаптивные же качества популяции и вида определяют его сохранность, иными словами, эволюционную успешность.

Исследования с направленным искусственным гамма-облучением семян сосны позволили установить, что частота аномалий морфогенеза сильнее развита у сеянцев в первые несколько лет, нежели у взрослых плодоносящих деревьев. Дополнительное острое гамма-облучение семян сосны обыкновенной выявило возрастание радиостойкости растений из хронически облучаемых популяций на 20 % по сравнению с контролем. Аномалии строения взрослых деревьев связаны с пороговой дозой 7 Гр/год [11].

Цель работы

Цель работы — оценка вклада радиационной нагрузки как фактора внешней среды в изменение генетической структуры субпопуляций сосны и дуба.

Объекты и методы

Работы по радиологическому исследованию земель лесного фонда выполняли специалисты филиала ФБУ «Рослесозащита» — «Центр защиты леса Воронежской области», имеющие соответствующее профильное образование и опыт работ.

Для изучения были заложены стационарные участки. Размер стационарных участков, заложенных в типичных для лесничества лесорастительных условиях, составил 50×50 м. На стационарных участках осуществляли отбор проб древесины без коры, древесины с корой и коры без древесины для последующих измерений. Кроме того, на стационарных участках закрепляли пять постоянных точек и выполняли дозиметрию. При дозиметрии на постоянных точках проводили замеры мощности дозы гамма-излучения.

Для определения средней фактической плотности загрязнения были проведены измерения удельной активности цезия-137 в пробах почвы из стационарных участков.

Подготовку счетных образцов проводили в лаборатории радиационного контроля в соответствии с принятыми методиками, утвержденными и введенными в действие приказом Рослесхоза от 05.09.1994 г. № 192.

В зоне наибольшего радиоактивного загрязнения проводили отбор образцов древесины основных лесообразующих пород (дуба черешчатого и сосны обыкновенной) с целью исследования биологической устойчивости генетического аппарата к постоянно повышенному радиационному фону.

Данный вид исследования включает в себя:

- отбор образцов вегетативных частей растений (листья, хвоя, древесины);
- выделение ДНК;
- постановку полимеразной цепной реакции (ПЦР);
- проведение электрофореза;
- визуализацию результатов;
- анализ полученных данных.

Для оценки состояния лесных генетических ресурсов специалисты центра защиты леса Воронежской обл. провели молекулярно-генетический анализ 24 образцов растительного материала сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* — 10 шт.) и дуба черешчатого (*Quercus robur* — 14 шт.), собранных с загрязненных территорий Белгородской обл. — Алексеевского и Красненского лесничеств. Для оценки степени устойчивости и дефицита гетерозигот результаты ДНК-анализа сравнили с генетическими показателями нормальных (контрольных) насаждений из Белгородской обл. Шебекинского лесничества (в том же количестве по породам).

Исследование степени гетерозиготности выборок сосны обыкновенной и дуба черешчатого проводили с использованием метода SSR-анализа [12], показавшего свою эффективность при изучении генотипа на популяционном уровне [13–16]. Выделение ДНК проведено СТАВ-методом [17]. Концентрацию ДНК после выделения измеряли с помощью спектрофотометра

NanoPhotometer® P-Class P 330. ПЦР проводили на амплификаторе T100 Thermal Cycler фирмы Bio-Rad. В работе использовали пять SSR-праймеров для сосны обыкновенной: *lw_isotig21953*, *Psy142*, *Psy144*, *psy 117*, *lw_isotig04306*, и восемь SSR-праймеров для дуба черешчатого: *QrZAG112*, *QrZAG7*, *QrZAG87*, *QrZAG96*, *QrZAG39*, *QrZAG11*, *QrZAG20*, *QrZAG110*. Продукты амплификации разделяли в 6 % ПААГ (трис-ЭДТА-ацетатная буферная система) вертикальной электрофоретической камере VE-20 фирмы Helicon. Гели окрашивали в растворе бромистого этидия, далее визуализировали результаты с помощью системы гель документации. В качестве стандартного маркера длины использовали ДНК плазмиды *pBR322 E. coli*, обработанную эндонуклеазой рестрикции *HpaII*. Молекулярный вес ампликонов определяли с помощью программного обеспечения Photo-Capt.

Каждый SSR-фрагмент рассматривали как генетический локус. Генетические параметры образцов оценивали на основании полиморфизма между микросателлитными локусами. В каждом локусе определяли количество четких ярких воспроизводимых полос, которые принимали за доминантные аллели, а отсутствие полос — за рецессивные. Биологическая устойчивость геномов двух видов была опосредованно определена на молекулярном уровне через процент гетерозиготности выборок по сравнению с радиационно «чистыми» насаждениями.

Результаты и обсуждение

У исследованных образцов сосны обыкновенной всего выявлено 17 аллельных вариантов, у дуба черешчатого — 26. Уровень полиморфизма обеих пород составляет 100 %. Основная зона фрагментов для сосны обыкновенной распределялась в диапазоне 153...262 п. н., для дуба черешчатого — 84...296 п. н. Каждый из образцов имел индивидуальный спектр амплифицируемых фрагментов, отличающийся от других образцов количеством, размером и степенью выраженности. Число локусов сосны обыкновенной, полученных при амплификации ДНК исследованных образцов с загрязненной территории с каждым из праймеров, изменялось от 1 до 7, у дуба черешчатого — от 2 до 6. Число локусов в нормальных (контрольных) насаждениях дуба черешчатого варьировали в диапазоне 4–8 для дуба черешчатого и 3–9 для сосны обыкновенной. Среднее их число на праймер составило 4. Для сосны обыкновенной максимальное количество полиморфных фрагментов получено в результате амплификации с праймером *lw_isotig21953* и составило 7 шт., минимальное с праймерами *psy 144* и *psy 142* — 1 шт. Максимальное количество полиморфных фраг-

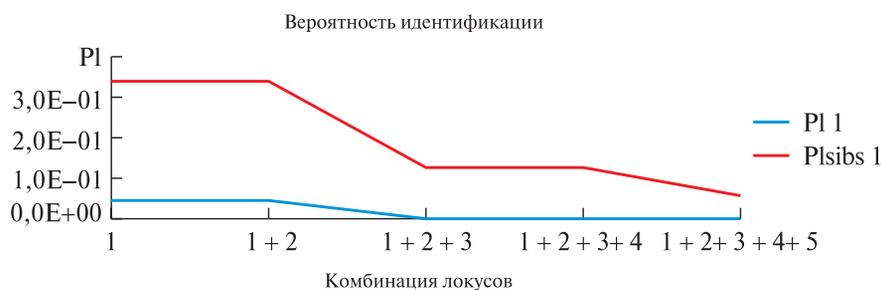


Рис. 1. Вероятности совпадений двух особей из исследуемых образцов сосны обыкновенной Областного казенного учреждения «Красненское лесничество»

Fig. 1. Match probabilities of two individuals from the studied samples of Scots pine of the Regional State Institution «Krasnenskoye Forestry»

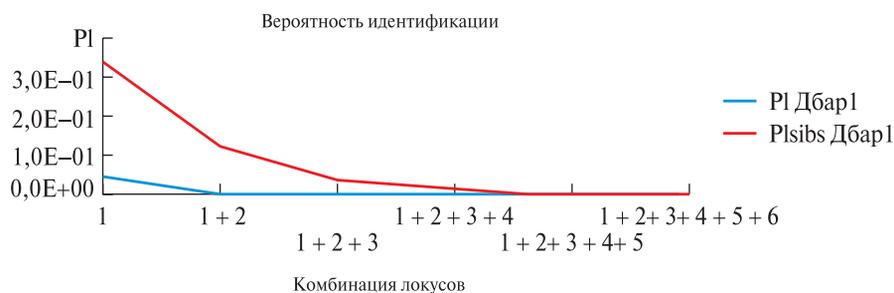


Рис. 2. Вероятности совпадений двух особей из исследуемых образцов дуба черешчатого Областного казенного учреждения «Алексеевское лесничество»

Fig. 2. Match probabilities of two individuals from the studied samples of Common oak of the Regional state institution «Alekseevskoye forestry»

ментов для дуба черешчатого из зоны радиационного обсеждения получено в результате асплификации с праймером QrZAG39 — 7 шт., минимальное с праймером QrZAG96 — 2 шт. Однако следует помнить, что при генетической паспортизации могут не учитываться уникальные аллели. У образцов из нормальных насаждений количество аллелей больше, для локуса QrZAG5b выявлено 8 аллелей, менее полиморфными оказались локусы QrZAG96, QrZAG110 (4 аллеля).

Полученные значения F -статистик Райта показывают, что каждое отдельное дерево в нормальных насаждениях в среднем обнаруживает 15%-й дефицит гетерозигот относительно популяции и около 27 % составляет дефицит гетерозиготных генотипов относительно вида *Quercus robur*. Для образцов из зон с радиационным загрязнением 0...0,99 Ки/км² дефицит гетерозигот выше на 7 %, а зон загрязнения 1...4,99 Ки/км² — на 12 % относительно нормальных насаждений, что является указанием на снижение их устойчивости к неблагоприятным факторам окружающей среды.

По мнению некоторых авторов, радиоактивное загрязнение произошедшее в результате аварии на Чернобыльской атомной электростанции в 1986 г. не могло не отразиться на генетической структуре субпопуляций сосны и дуба, что следует учитывать в мониторинге лесные экосистем [4, 6, 9, 11, 12, 18].

Увеличенная доля гомозигот обусловлена превышением естественной скорости накопления генетических изменений в субпопуляциях, что указывает на искусственные причины, наиболее вероятной из которых в данном случае является постоянно повышенный радиационный фон.

В рамках исследований была проведена оценка вероятности совпадения каждого генотипа (происхождения). При установлении различий в локусах достаточно обнаружить несовпадение в одном исследованном аллеле исследуемых частей ДНК для исключения второй степени родства (сиссов) геномов растений. Эта проверка целесообразна по причине вероятности ложного генотипирования отдельных локусов. Вероятность совпадения рассчитывалась на основе данных о выявленных частотах встречаемости аллелей в исследуемых образцах. Все исследованные особи не имеют сходных аллелей в исследуемых локусах (рис. 1, 2).

Выводы

Молекулярно-генетический анализ 10 образцов сосны обыкновенной и 14 образцов дуба черешчатого показал, что полиморфизм SSR-маркеров у исследуемых образцов составил 100 %. Используемые в исследовании маркеры позволяют проводить мониторинг состояния популяций видов родов *Pinus* и *Quercus*. Полученные

значения F -статистик Райта выявили высокий дефицит гетерозиготных генотипов в насаждениях с радиационно-загрязненных территорий. Это состояние может найти отражение в снижении продуктивности насаждений рассмотренных лесообразующих видов.

Список литературы

- [1] Плющиков В.Г., Семенов О.Г. Физические и биологические основы действия ионизирующих излучений. М.: РУДН, 2006. 64 с.
- [2] Шафиркин А.В., Бенгин В.В. Особенности действия космической радиации на биологические объекты и радиационный риск длительных космических полетов. URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/cosmrad/cosmrad1.htm> (дата обращения 30.10.2021).
- [3] Карова И.А., Шаваев М.А. Концентрация радионуклидов в почве и степень накопления их в почве // Агробиологический вестник, 2006, № 6. С. 29–30.
- [4] Яблоков А.В., Нестеренко В.Б., Нестеренко А.В. Чернобыль: последствия катастрофы для человека и природы. СПб.: Наука, 2007. 376 с.
- [5] Радиация: эффекты и источники. Программа ООН по окружающей среде, 2016. [электронная версия] URL: wedocees.unep.org (дата обращения 30.10.2021).
- [6] Щетинкин С.В., Щетинкина Н.А. Некоторые аспекты влияния радиоактивного загрязнения на генеративную сферу сосны обыкновенной // Лесотехнический журнал, 2013. № 2. С. 168–172.
- [7] Осипов А.Н. Как радиация повреждает ДНК? URL: <https://postnauka.ru/wtf/155857> (дата обращения 22.10.2021).
- [8] Залетаев Д.В. Мастер-класс. Онкогеномика. Генетические маркеры. Аллельные делеции или потеря гетерозиготности. URL: http://www.oncology.ru/specialist/oncogenomicesij/genetic_markers/deletions/ (дата обращения 30.10.2021).
- [9] Муратова Е.Н., Седельникова Т.С. Геномные и хромосомные мутации у сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в экстремальных условиях произрастания // Хвойные бореальные зоны, 2004. Т. 22. № 1–2. С. 143–148.
- [10] Vilenchik M.M., Knudson A.G. Inverse radiation dose-rate effects on somatic and germ-line mutations and DNA damage rates (англ.) // Proceedings of the National Academy of Sciences, 2000, v. 97, no. 10, pp. 5381–5386.
- [11] Игонина Е.В. Изучение мутационного процесса в хронически облучаемых популяциях *Pinus sylvestris* L. (Сосна обыкновенная), произрастающих в зоне аварии на Чернобыльской атомной электростанции: автореф. дис.... канд. биол. наук. М., 2010. 110 с.
- [12] Lepais O., Leger V., Gerber S. Short Note: High Throughput Microsatellite Genotyping in Oak Species // *Silvae Genetica*, 2006, v. 55, no. 4–5, pp. 238–240.
- [13] Боронникова С.В. Молекулярно-генетический анализ и оценка состояния генофондов ресурсных видов растений Пермского края. Пермь: Изд-во Пермского ГНИУ, 2013. 223 с.
- [14] Боронникова С.В. Молекулярное маркирование и генетическая паспортизация ресурсных и редких видов растений с целью оптимизации сохранения их генофондов // Аграрный вестник Урала, 2009. № 2 (56). С. 57–59.
- [15] Боронникова С.В. Популяционно-генетический мониторинг генофондов редких ресурсных видов растений Пермского края // Флора Урала в пределах бывшей Пермской губернии и ее охрана: Материалы межрегион. конф., посвященной 140-летию со дня рождения П.В. Сюзева / под ред. Е.И. Демьяновой, С.А. Овеснова, Л.Г. Переведенцевой. Пермь: Изд-во Пермского ГНИУ, 2007. С. 37–43.
- [16] Svetlakov T.N., Boronnikova S.V., Yanbaev Y.A. Genetic diversity and differentiation in Ural populations of the aspen, *Populus tremula* L., as revealed by inter-simple sequence repeat (ISSR) markers // *Silvae Genetica*, 2014, no. 1, pp. 39–41.
- [17] Программа и методика по пункту 59. План мероприятий (дорожной карты) «Развитие биотехнологии и генной инженерии». Пушкино: Изд-во ФБУ «Рослесозащита», 2014. 205 с.
- [18] Щетинкин С.В., Щетинкина Н.А. Особенности динамики радиального прироста дуба черешчатого в условиях радиоактивного загрязнения лесов Центральной лесостепи // Лесотехнический журнал, 2014. Т. 4. № 3 (15). С. 130–139.

Сведения об авторах

Сиволапов Владимир Алексеевич — канд. с.-х. наук, директор филиала ФБУ «Рослесозащита» — «ЦЗЛ Воронежской области», sivalapovva@rcfh.ru

Логина Людмила Александровна — канд. биол. наук, зам. директора филиала ФБУ «Рослесозащита» — «ЦЗЛ Воронежской области», loginova@rcfh.ru

Воробьева Елена Анатольевна — нач. отдела мониторинга состояния лесных генетических ресурсов филиала ФБУ «Рослесозащита» — «ЦЗЛ Воронежской области», vorobyeva@rcfh.ru

Вепринцев Владислав Николаевич — зам. начальника отдела мониторинга состояния лесных генетических ресурсов филиала ФБУ «Рослесозащита» — «ЦЗЛ Воронежской области», veprintsevvn@rcfh.ru

Щетинкин Сергей Васильевич — канд. биол. наук, нач. отдела радиологии филиала ФБУ «Рослесозащита» — «ЦЗЛ Воронежской области», chetinkinsv@rcfh.ru

Поступила в редакцию 17.01.2022.

Одобрено после рецензирования 22.03.2022.

Принята к публикации 13.05.2022.

COMMON OAK AND SCOTS PINE SUBPOPULATIONS GENETIC CHANGES UNDER PROLONGED EXPOSURE TO LOW DOSES OF RADIATION

V.A. Sivolapov, L.A. Loginova, E.A. Vorob'eva, V.N. Veprintsev✉, S.V. Shchetinkin

FBU «Roslesozaschita» — «CFP of Voronezh region», 105, Lomonosov st., 394000, Voronezh, Russia

veprintsevvn@rcfh.ru

The probability of population significant changes as a result of prolonged exposure to increased radiation in the habitat of the main forest-forming species is considered. The amount of contamination at stationary sites is correlated with the level of heterozygosity of pine and oak samples.

Keywords: radioactive contamination, pine, oak, radiation exposure, PCR, DNA, heterozygosity

Suggested citation: Sivolapov V.A., Loginova L.A., Vorobyova E.A., Veprintsev V.N., Shchetinkin S.V. *Otsenka izmeneniy geneticheskoy struktury subpopulyatsiy duba chereschatogo i sosny obyknovnoy v usloviyakh dlitel'nogo vozdeystviya malyykh doz radiatsii* [Common oak and scots pine subpopulations genetic changes under prolonged exposure to low doses of radiation]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 3, pp. 14–20. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-14-20

References

- [1] Plyushchikov V.G., Semenov O.G. *Fizicheskie i biologicheskie osnovy deystviya ioniziruyushchikh izlucheniy* [Physical and biological bases of the action of ionizing radiation]. Moscow: RUDN, 2006, 64 p.
- [2] Shafirkin A.V., Bengin V.V. *Osobennosti deystviya kosmicheskoy radiatsii na biologicheskie ob'ekty i radiatsionnyy risk dlitel'nykh kosmicheskikh poletov* [Features of the effect of cosmic radiation on biological objects and the radiation risk of long-term space flights]. Available at: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/cosmrad/cosmrad1.htm> (accessed 30.10.2021).
- [3] Karova I.A., Shavaev M.A. *Kontsentratsiya radionuklidov v pochve i stepen' nakopleniya ikh v pochve* [The concentration of radionuclides in the soil and the degree of their accumulation in the soil]. *Agrokhimicheskii vestnik [Agrochemical Bulletin]*, 2006, no. 6, pp. 29–30.
- [4] Yablokov A.V., Nesterenko V.B., Nesterenko A.V. *Chernobyl': posledstviya katastrofy dlya cheloveka i prirody* [Chernobyl: consequences of the catastrophe for man and nature]. St. Petersburg: Nauka. Leningradskoe otdelenie, 2007, 376 p.
- [5] *Radiatsiya: efekty i istochniki / Nauchnyy komitet OON po deystviyu atomnoy radiatsii (NKDAR)* [Radiation: Effects and Sources / UN Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (NCDAR)]. 2016. Available at: wedoцезий.unep.org
- [6] Shchetinkin S.V., Shchetinkina N.A. *Nekotorye aspekty vliyaniya radioaktivnogo zagryazneniya na generativnyuyu sferu sosny obyknovnoy* [Some aspects of the influence of radioactive contamination on the generative sphere of scots pine]. *Lesotekhnicheskii zhurnal [Forestry Journal]*, 2013, no. 2, pp. 168–172.
- [7] Osipov A.N. *Kak radiatsiya povrezhdaet DNK?* [How does radiation damage DNA?]. Available at: <https://postnauka.ru/wtf/155857> (accessed 22.10.2021).
- [8] Zaletaev D.V. *Master-klass. Onkogenomika. Geneticheskie markery. Allel'nye deletsii ili poterya geterozigotnosti* [Master class. Oncogenomika. Genetic markers. Allelic deletions or loss of heterozygosity]. Available at: http://www.oncology.ru/specialist/oncogenomiceзий/genetic_markers/deletions/ (accessed 30.10.2021).
- [9] Muratova E.N., Sedel'nikova T.S. *Genomnye i khromosomnye mutatsii u sosny obyknovnoy (Pinus sylvestris L.) v ekstremal'nykh usloviyakh proizrastaniya* [Genomic and chromosomal mutations in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) under extreme growing conditions]. *Khvoynye boreal'nye zony [Coniferous boreal zones]*, 2004, t. 22, no. 1–2, pp. 143–148.
- [10] Vilenchik M.M., Knudson A.G. *Inverse radiation dose-rate effects on somatic and germ-line mutations and DNA damage rates (angl.)*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2000, v. 97, no. 10, pp. 5381–5386.
- [11] Igonina E.V. *Izuchenie mutatsionnogo protsessa v khronicheski obluchaemykh populyatsiyakh Pinus sylvestris L. (Sosna obyknovennaya), proizrastayushchikh v zone avarii na chernobyl'skoy atomnoy elektrostantsii* [Study of mutation process in chronically irradiated populations of *Pinus sylvestris* L. (Common pine) growing in the Chernobyl nuclear power plant accident zone]. *Dis. Cand. Sci. (Biol.)*. Moscow, 2010, 110 p.
- [12] Lepais O., Leger V., Gerber S. *Short Note: High Throughput Microsatellite Genotyping in Oak Species*. *Silvae Genetica*, 2006, v. 55, no. 4–5, pp. 238–240.
- [13] Boronnikova S.V. *Molekulyarno-geneticheskiy analiz i otsenka sostoyaniya genofondov resursnykh vidov rasteniy Permskogo kraya* [Molecular genetic analysis and assessment of gene pools of resource species of plants in Perm Krai]. Perm': Perm State University, 2013, 223 p.
- [14] Boronnikova S.V. *Molekulyarnoe markirovanie i geneticheskaya pasportizatsiya resursnykh i redkikh vidov rasteniy s tsel'yu optimizatsii sokhraneniya ikh genofondov* [Molecular labeling and genetic certification of resource and rare plant species in order to optimize the conservation of their gene pools]. *Agrarnyy vestnik Urala [Agrarian Bulletin of the Urals]*, 2009, no. 2 (56), pp. 57–59.
- [15] Boronnikova S.V. *Populyatsionno-geneticheskiy monitoring genofondov redkikh resursnykh vidov rasteniy Permskogo kraya* [Population-genetic monitoring of gene pools of rare resource plant species of Perm Krai]. *Flora Urala v predelakh byvshey Permskoy gubernii i ee okhrana: materialy mezhhregional'noy konferentsii, posvyashchennoy 140-letiyu so dnya rozhdeniya P.V. Syuzeva* [Flora of the Urals within the former Perm province and its protection: materials of the interregional conference dedicated to the 140th anniversary of the birth of P.V. Syuzeva]. Ed. E.I. Demyanova, S.A. Ovesnov, L.G. Perevedentseva. Perm', 2007 pp. 37–43.

- [16] Svetlakova T.N., Boronnikova S.V., Yanbaev Y.A. *Genetic diversity and differentiation in Ural populations of the aspen, Populus tremula L., as revealed by inter-simple sequence repeat (ISCTPONЦИЙ) markers* [Genetic diversity and differentiation in Ural populations of the aspen, Populus tremula L., as revealed by inter-simple sequence repeat (ISCTPONЦИЙ) markers]. *Silvae Genetica*, 2014, no. 1, pp. 39–41.
- [17] *Programma i metodika po punktu 59. Plan meropriyatiy (dorozhnoy karty) «Razvitie biotekhnologii i gennoy inzhenerii»* [Program and methodology under item 59. The Action plan (roadmap) «Development of biotechnology and genetic engineering»]. Pushkino: Roslesozashchita, 2014, 205 p.
- [18] Shchetinkin S.V., Shchetinkina N.A. *Osobennosti dinamiki radial'nogo prirosta duba chereschatogo v usloviyakh radioaktivnogo zagryazneniya lesov Tsentral'noy lesostepi* [Features of the dynamic of radial growth of the pedunculate oak in the conditions of radioactive contamination of forests of the Central forest-steppe]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Journal], 2014, t. 4, no. 3 (15), pp. 130–139.

Authors' information

Sivolapov Vladimir Alekseevich — Cand. Sci. (Agriculture), Director of the Branch of the FBU «Roslesozashchita» — «CPF of the Voronezh region», sivalapovva@rcfh.ru

Loginova Liudmila Aleksandrovna — Cand. Sci. (Biology), Deputy Head of the Director of the Branch of the FBU «Roslesozashchita» — «CPF of the Voronezh region», loginovala@rcfh.ru

Vorob'eva Elena Anatol'evna — Head of the Department of Monitoring the state of forest genetic resources of the Branch of FBU «Roslesozashchita» — «CPF of the Voronezh region», vorobyevaea@rcfh.ru

Veprintsev Vladislav Nikolaevich — Deputy Head of the Department of Monitoring the state of forest genetic resources of the Branch of the FBU «Roslesozashchita» — «CPF of the Voronezh region», veprintsevvn@rcfh.ru

Shchetinkin Sergei Vasilevich — Cand. Sci. (Biology), Head of the Radiology Department of the Branch of the FBU «Roslesozashchita» — «CPF of the Voronezh region», chetinkinsv@rcfh.ru

Received 17.01.2022.

Approved after review 22.03.2022.

Accepted for publication 13.05.2022.

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

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЛИСТВЕННИЦЫ ОЛЬГИНСКОЙ (*LARIX OLGENSIS* A. HENRY) НА БОРИСОВСКОМ ПЛАТО (ПРИМОРСКИЙ КРАЙ)

Н.Г. Розломий^{1✉}, В.Ю. Минхайдаров¹, А.Н. Белов^{2, 1}, У. Хайфэн³

¹ФГБОУ ВО «Приморская государственная сельскохозяйственная академия», 692510, г. Уссурийск, пр. Блюхера, д. 44

²ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, д. 10

³Шэньянский технологический институт № 1, 113122, восточный участок дороги Биньхэ, пров. Ляонин, р-н Ванхуа, г. Фушунь, Китай

boss.shino@mail.ru

Представлены данные исследований современного состояния биогрупп лиственницы ольгинской (лиственницы Любарского), произрастающих на территории Борисовского плато Приморского края. Описано место произрастания лиственницы ольгинской, подробно рассмотрен травяной покров территории. Охарактеризовано состояние древостоя по основным таксационным показателям. Описано происхождение изученных участков насаждений лиственницы, определен состав древостоя с разделением на ярусы (по массе и числу деревьев). По результатам маршрутных исследований определена полнота, средняя высота и диаметр стволов лиственницы. Результаты измерений 100 деревьев обработаны в программе MS Excel STATISTIKA for Windows. Определен возраст древостоя, проведен анализ влияния среднегодовой температуры и годовой суммы выпавших осадков на прирост лиственницы по диаметру, а также динамики прироста модельных деревьев по диаметру. Установлено, что лиственница ольгинская в условиях Борисовского плато показывает отрицательные темпы прироста по диаметру при недостатке и избытке влаги, а при высоких температурах темпы прироста уменьшаются. Показана общая зависимость приростов стволов по диаметру от климатических факторов. Деревья лиственницы, произрастающая в одинаковых микроусловиях, показали абсолютно разные темпы прироста, что объясняется, очевидно, генетическими различиями.

Ключевые слова: лиственница, Приморский край, прирост по диаметру, среднегодовое количество осадков, среднегодовая температура

Ссылка для цитирования: Розломий Н.Г., Минхайдаров В.Ю., Белов А.Н., Хайфэн У. Современное состояние лиственницы ольгинской (*Larix olgensis* A. Henry) на Борисовском плато (Приморский край) // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 3. С. 21–28. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-21-28

Самая распространенная формация среди лесов Дальнего Востока — это лиственничные леса, которые занимают 59,2 % площади всех лесов Дальнего Востока [1, 2]. По общему запасу древесины (61,2 %) эти леса также преобладают над всеми другими лесами — хвойными, твердо- и мягколиственными, а также над кустарниками.

Все виды лиственницы занимают территорию от Южного Приморья до самых северных границ распространения древесной растительности (почти до 71° с. ш.). Современные рыночные условия, сформировавшиеся в лесном хозяйстве, придали использованию лиственничных лесов актуальность [3]. Занимая более 40 % покрытой лесом площади России, эти леса пока используются слабо. Большой вклад в изучение лиственничных лесов Приморского края внес профессор Г.В. Гуков (2008) [4]. В настоящее время ботаниками признано и описано три вида лиственницы — лиственница Гмелина (даурская) (*L. gmelinii* (Rupr) Rupr), лиственница Каяндера (*L. cajanderi* Mayr.) и лиственница ольгинская

(*Larix olgensis* A. Henry) [5–7]. Тем не менее в работах В.Н. Сукачева лиственница Любарского (*Larix Lubarskii* Sukacz.) описана по гербарным экземплярам, которые были собраны в 1931 г. в урочище р. Ананьевки (приток р. Раздольной) в юго-западной части Приморского края. Академик АН СССР В.Н. Сукачев назвал описанную им лиственницу в честь профессора Е.И. Любарского (Дальневосточный государственный университет, г. Владивосток), занимавшегося подсочкой лиственницы, который собрал и передал ему гербарные образцы. Согласно описанию академика В.Н. Сукачева, для этого вида лиственницы характерны бледно-желтоватые голые годичные приросты, относительно крупные (2,5...3,0 см длиной) и многочешуйчатые (38...45) шишки, плохо заметные прицветники [8]. В середине XX в. И.К. Шишкин, Н.В. Дылис, В.А. Розенберг и другие исследователи собрали новые гербарные образцы со всего ареала лиственницы Любарского. Их описание и анализ показали, что многие морфологические признаки лиственницы Любарского не укладываются в рамки приведенного описания вида [9–12]. Профессор Н.В. Дылис в 1961 г.



Рис. 1. Село Монакино, общий вид (а), пробная площадь (б) (Яндекс карты, Airbus DS 2021)
Fig. 1. Monakino village, general view (a), trial plot (б) (Yandex maps, Airbus DS 2021)

расширил морфологические признаки лиственницы Любарского, включив в описанный вид все особи с уклоняющимися от прежнего определения признаками [9]. Профессор В.М. Урусов в своих работах утверждал, что лиственница Любарского имеет морфологические признаки четырех родителей, включая лиственницу принца Рупрехта и лиственницу Гмелина [13, 14].

Цель работы

Цель работы — оценка современного состояния лиственницы ольгинской, произрастающей в пределах Борисовского плато Приморского края.

Материалы и методы

Работа была начата с изучения трудов профессора Г.В. Гукова, посвященным лиственнице Любарского. Далее по таксационному описанию Уссурийского лесничества и по карте определяли ее место произрастания. Пробная площадь (50×50 м) была заложена в 23 км от с. Монакино и на расстоянии 1,7 км от поворота на охотхозяйство «Павлиновка», у пограничного поста «Борисовская застава» (46°44'50" с. ш., 125°27'28" в. д.) (рис. 1).

Все работы были проведены в соответствии с приемами и методами лесной таксации [14–18]. Древоустой описывали по следующим таксационным показателям: происхождению, составу с разделением на ярусы (по доле запаса древесной породы относительно общего запаса яруса (%)) и числу деревьев), возрасту, полноте, средней высоте и диаметру стволов, бонитету, сумме площадей сечений, запасу древесины.

Общую сомкнутость крон деревьев на пробной площади определяли глазомерно.

Кроме этого, по данным перечетных ведомостей, рассчитывали абсолютную полноту дре-

востоя путем суммирования площадей сечения деревьев всех ступеней толщины на пробной площади с последующим переводом на 1 га. Подлесок, травяной покров в пределах пробной площади изучали согласно методическим указаниям, используемым при лесотипологических исследованиях [14, 19, 20]. Подробное описание подлеска осуществляли после осмотра всей пробной площади. Для определения точного возраста древостоя и приростов по диаметру стволов были взяты керны с двух модельных деревьев. Результаты измерений 100 деревьев (диаметра и высоты) лиственницы были обработаны в программе MS Excel и STATISTIKA for Windows.

Результаты и обсуждение

Пробная площадь была заложена в разнотравном лиственничнике, который занимает более 3/4 части всей площади Борисовского базальтового плато, располагаясь на ровных и возвышенных частях рельефа (рис. 2). Увлажнение территории достаточное, обеспечивается атмосферными осадками.

На пробной площади очень много выпавших деревьев (из 140 деревьев 23 выпавших, что составляет 16 %), очевидно, это происходит от избыточного переувлажнения, поскольку в ямах, оставшихся на месте нахождения корневой системы, сосредотачивается большое количество воды (рис. 3).

Почвы — буро-таежные мощные, задернованные на суглинисто-щебнистом элювии базальта. По данным Гукова Г.В. в период Великой Отечественной войны (1941–1945 гг.) участок был пройден интенсивной выборочной рубкой, вырубалась лиственница и реже дуб монгольский [4].

В последующие годы устойчивым низовым пожаром был уничтожен весь подрост и молодняк лиственницы.

Древостой — одноярусный, низкополнотный: полнота 0,3, IV класса бонитета, запас древесины по лиственнице составил 22,1 м³, общий запас древесины 48,0 м³, возраст главной породы 30...50 лет (рис. 3).

Таксационная характеристика пробной площади места произрастания лиственницы ольгинской имеет вид:

Географическое

положение, экспозиция,

крутизна склона.....повышенный участок

Борисовского плато

Ярус.....I

Доля запаса древесной породы

от общего запаса яруса, %.....10Л ед. Бм

По числу стволов.....10Л+Бм

Число стволов на 1 га:

лиственницы.....52

всех пород.....60

Сумма площадей сечений, м².....0,598

Средняя высота, м.....20,0 ± 2,2

Средний диаметр, см.....36,6 ± 1,7

Подлесок — очень редкий, с общим покрытием почвы 10...20 % и высотой 1...1,5 м, если не считать нескольких кустов спиреи иволистной, жимолости съедобной, ивы козьей, находящихся в угнетенном состоянии.

В травяном покрове наблюдается пестрое смешение лугово-лесных и лугово-болотных видов. По сравнению с разнотравным лиственничником здесь заметно резкое обеднение видов травяного покрова. Степень покрытия почвы травой 70...80 %. Общий фон создают чемерица, осока Шмидта и осока топяная. Рассеянно встречаются лабазник дланевидный, чистостел коричный, смилацина даурская, ломонос бурый, хвощ болотный, осока стоповидная, дудник Максимовича, кочедыжник игольчатый, вахта трехлистная.

Результаты исследований показали, что максимальный диаметр ствола лиственницы в древостое составляет 51 см, максимальная высота — 30,2 м. Минимальные значения (диаметр ствола — 6 см, высота — 8 м) отмечены у шести деревьев из 100 измеренных образцов.

Всего были взяты керны с трех модельных деревьев (один керн обработать не удалось, поскольку у модельного дерева оказалась сердцевинная гниль). Данные по двум моделям: модель 1 — возраст 41 год; модель 2 — возраст 39 лет.

Возраст древостоя в среднем составляет 40–41 год, так как при подборе моделей брали средние по диаметру стволов деревья, представляющие большинство по древостою. По микро-

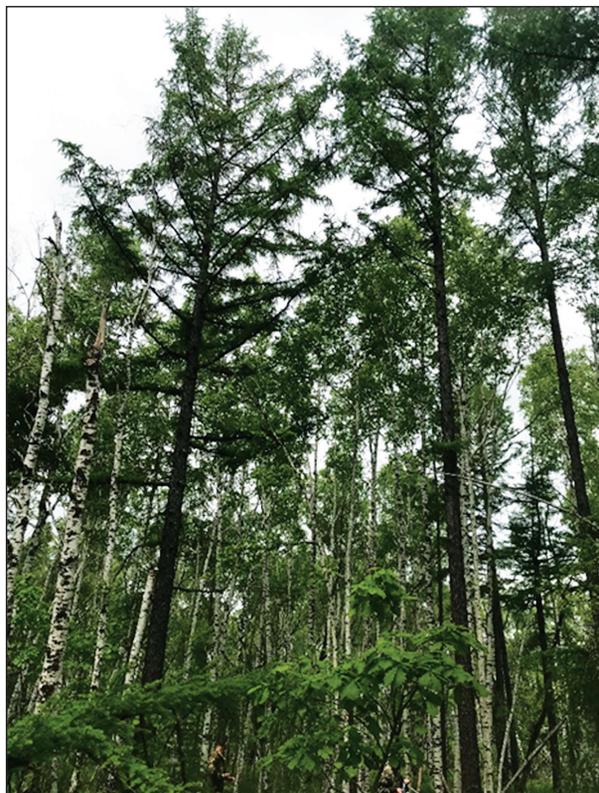


Рис. 2. Биограмма лиственницы ольгинской на Борисовском плато

Fig. 2. Olginskaya larch Biogroup on the Borisov Plateau



Рис. 3. Заболоченная яма — место выпавшего дерева лиственницы

Fig. 3. Waterlogged pit — the place of a fallen larch tree

рельефу местности, первая модель произрастает на возвышенном участке относительно общего рельефа, в то время как вторая модель находится в понижении (сильное переувлажнение почвы), где наблюдается развитие гигрофитов.

Сравнение динамики прироста модельных деревьев лиственницы ольгинской по диаметру стволов в зависимости от возраста показано на рис. 4.

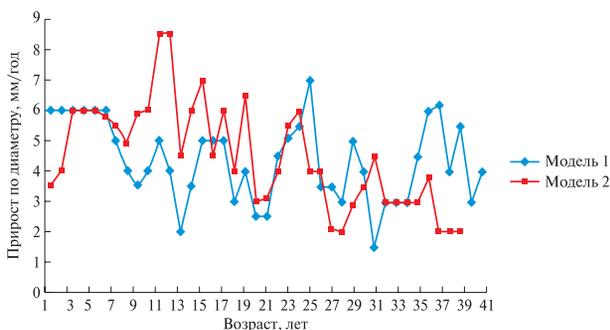


Рис. 4. Динамика прироста модельных деревьев лиственницы по диаметру стволов по годам

Fig. 4. Growth dynamics of model larch trees by trunk diameter by years

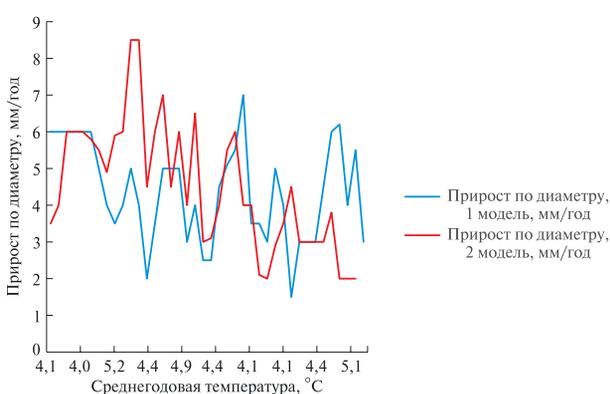


Рис. 5. Влияние среднегодовой температуры на прирост лиственницы по диаметру ствола

Fig. 5. Average annual temperature influence on the growth of larch by trunk diameter

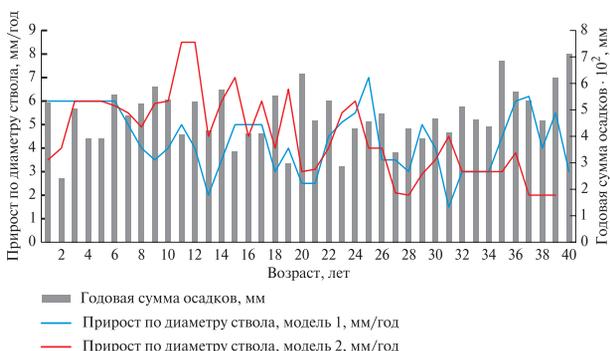


Рис. 6. Влияние годовой суммы выпавших осадков на прирост лиственницы по диаметру ствола

Fig. 6. Annual amount of precipitation influence on the growth of larch by trunk diameter

Наблюдается определенная корреляция по динамике прироста между модельными деревьями по диаметру стволов по годам, достоверность различий составляет 1,53, однако имеются различия по величине прироста. Средний прирост по диаметру у модели 1 составляет 4,3 мм/год, у модели 2 — 4,5 мм/год. Произрастая в одинаковых условиях, обе модели в разный возрастной период прирастают по-разному.

Для определения возможного влияния климатических факторов и микроусловий на величину прироста, было проведено его сравнение со среднегодовой температурой и годовой суммой выпавших осадков, выраженной в дециметрах [21, 22].

Анализ показал, что в условиях Борисовского плато наблюдается общая зависимость приростов по диаметру стволов от климатических факторов. По данным Г.В. Гукова [4], к количеству осадков и влажности воздуха лиственница Любарского относительно не требовательна, она относится к категории мезофитов и хорошо переносит временный недостаток влаги, что коррелируется с нашими наблюдениями. Лиственница ольгинская плохо переносит как сильное увлажнение, так и недостаток влаги, что видно из развития моделей. Температурный режим оказывает менее выраженное воздействие на лиственницу [23, 24]. Освещение не воздействует на развитие древостоя, так как он представляет собой редину, и все деревья находятся в одинаковых условиях (рис. 5) [25].

Модель 2 отличается более интенсивным приростом по диаметру ствола при температуре от 9 до 13 °С, в этом же температурном интервале модель 1 характеризуется низким уровнем прироста по диаметру ствола. При температуре свыше 33 °С модель 1 показывает прирост по диаметру ствола от 3 до 6 мм/год.

Влияние осадков на прирост модельных деревьев аналогично влиянию среднегодовой температуры на прирост (рис. 6).

Модель 2 показывает максимальные темпы прироста диаметра стволов лиственницы при количестве осадков от 700 до 800 мм/год в возрасте 9...12 лет, модель 1 — темпы прироста максимума достигают при количестве осадков — 600 мм/год в возрасте 25...26 лет. Модель 1 — минимальные темпы прироста по диаметру ствола при 200–300 мм/год и в возрасте 27...30 лет, модель 2 — минимум прироста по диаметру ствола совпадает с моделью 1. При максимальных среднегодовых количествах осадков наблюдается снижение приростов по диаметру: в возрасте 7...10 лет прирост по диаметру ствола у модели 1 и у модели 2 снижается с 6 мм/год до 3 мм/год, в возрастной период 12...14 лет — снижение идет до 2 мм/год, в период 19...22 года — с 6,5 мм/год до 3,5 мм/год.

Выводы

Проведенные исследования и анализ модельных деревьев показали, что лиственница ольгинская в условиях Борисовского плато показывает отрицательные темпы прироста по диаметру стволов и при недостатке, и при избытке влаги, а также при высоких температурах. Деревья лист-

венницы, произрастая в одинаковых микроусловиях, показали абсолютно разные темпы прироста по диаметру ствола.

Список литературы

- [1] Лесной комплекс Дальнего Востока России: аналитический обзор / под ред. А.С. Шейнгауза. Владивосток; Хабаровск: Изд-во ДВО РАН, 2005. 160 с.
- [2] Gukov G.V., Rozlomyi N.G. The larch in the Russian far east: Decorative and curative properties // *Research J. of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, 2015, v. 6, no. 4, pp. 222–226.
- [3] Зоео Д., Ундраа М. Динамика фитоценозов после рубки ухода в псевдотаежных лиственничных молодняках // *Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии*, 2015. № 14. С. 182–184.
- [4] Гуков Г.В. Лиственницы и лиственничные леса российского Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 2008. 365с.
- [5] Богумил Т.А. Дендрообраз Сибири: лиственница // *Культура и текст*, 2021. № 3(46). С. 196–204. DOI 10.37386/2305-4077-2021-3-196-204
- [6] Лавренов М.А. Сравнительный анализ изменчивости лиственницы Любарского с лиственницей даурской и ольгинской // *Актуальные проблемы развития лесного комплекса: Материалы XVI Междунар. науч.-техн. конф., Вологда, 05 декабря 2018 года / под ред. С.М. Хамитовой. Вологда: Изд-во Вологодского государственного университета, 2019. С. 50–51.*
- [7] Гриднева Н.В., Гуков Г.В., Розломий Н.Г., Рейф О.Ю. Реликтовые древесные растения Приморского края и их декоративные свойства // *Вестник КрасГАУ*, 2014. № 12(99). С. 62–65.
- [8] Сукачев В.Н. О двух новых ценных для лесного хозяйства древесных породах // *Труды и исследования по лесному хозяйству и лесной промышленности. Л.*, 1931. Вып. 10. С. 47–56.
- [9] Дылис Н.В. Лиственница Восточной Сибири и Дальнего Востока. Изменчивость и природное разнообразие. М.: АН СССР, 1961. 210 с.
- [10] Розенберг В.А. Лиственница Комарова (Komarovii Kolesn.) в южном Сихотэ-Алине // *Комаровские чтения*, 1951. Вып. 111. С. 31–43.
- [11] Минхайдоров В.Ю. К познанию лиственницы ольгинской в Приморском крае // *Наука в образовательном процессе вуза: Матер. Междунар. науч.-практ. конф. (в 2-х частях). Часть II. Уссурийск*, 1997. С. 24–26.
- [12] Урусов В.М. Гибридизация в природной флоре Дальнего Востока и Сибири (причины и перспективы использования). Владивосток: Дальнаука, 2002. 229 с.
- [13] Урусов В.М., Лобанова И.И., Варченко А.И. Хвойные деревья и кустарники российского Дальнего Востока. География и экология. Владивосток: Дальнаука, 2004. 111 с.
- [14] Лесостроительная инструкция. Приказ Федерального агентства лесного хозяйства от 12 мая 2020 г. № 122. URL: <https://docs.cntd.ru/document/542621790> (дата обращения 15.09.2021).
- [15] Гаврилова О.И., Юрьева А.Л. Особенности роста лесных культур лиственницы сибирской в условиях Республики Карелия // *Хвойные бореальной зоны*, 2014. Т. 32. № 5–6. С. 23–28.
- [16] Вернодубенко В.С., Полягошко В.А., Гибов И.А. Результаты дендроклиматического анализа роста лиственницы в городе Вологда // *Роль аграрной науки в устойчивом развитии сельских территорий: Сборник V Всерос. (национальной) науч. конф., Новосибирск, 18 декабря 2020 года. Новосибирск: Издательский центр Новосибирского государственного аграрного университета «Золотой колос», 2020. С. 148–151.*
- [17] Ковылина О.П., Ковылин Н.В. Особенности распределения деревьев лиственницы по диаметру и высоте в защитных насаждениях Хакасии // *Вестник КрасГАУ*, 2008. № 3. С. 194–198.
- [18] Корякин В.Н., Дидиченко Ю.В., Романова Н.В. Рост смешанных лесных культур лиственницы и кедра корейского в Биробиджанском лесничестве // *Природные ресурсы и экология Дальневосточного региона: Материалы Междунар. науч.-практ. форума, Хабаровск, 25–26 октября 2012 года. Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2013. С. 105–106.*
- [19] Милютин Ю.А., Карасева М.А., Карасев В.Н. Диагностика состояния насаждений лиственницы сибирской в городских условиях // *Научному прогрессу — творчество молодых: Материалы IX Международной молодежной науч. конф. по естественнонаучным и техническим дисциплинам: в 3-х частях, Йошкар-Ола, 18–19 апреля 2014 года. Йошкар-Ола: Изд-во Поволжского государственного технологического университета, 2014. С. 40–42.*
- [20] Николаев А.Н., Федоров П.П. Влияние температурного режима почвы на радиальный прирост стволов лиственницы и сосны в Центральной Якутии // *Эколого-ботанические исследования в Якутии. Якутск: НИПК Сахаполиграфиздат, 2004. С. 67–73.*
- [21] Николаев А.Н., Угаров И.С. Различия режима увлажнения мерзлотных ландшафтов Центральной Якутии и его влияние на рост лиственниц // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 2011. Т. 13. № 1–4. С. 1016–1019.
- [22] Розломий Н.Г., Шелудько А.П. Характеристика состояния культур сосны и лиственницы на территории Уссурийского филиала КГКУ «Приморское лесничество» // *Интеграционные процессы мирового научно-технологического развития: сб. науч. тр. по Материалам Междунар. науч.-практ. конф. в 2-х частях, Белгород, 29 ноября 2017 года / под ред. Е.П. Ткачевой. Белгород: Изд-во ООО «Агентство перспективных научных исследований», 2017. С. 48–51.*
- [23] Ключников М.В., Маленко А.А. Рост культур лиственницы в среднегорье Алтая // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*, 2009. № 6(56). С. 31–34.
- [24] Мельник П.Г., Карасев Н.Н. Рост различных видов лиственницы в Подмосковье // *Леса Евразии — Уральские горы: Материалы V Междунар. конф. молодых ученых, посвященной 175-летию первого лесоустройства на Урале и 160-летию со дня рождения лесовода Ф.А. Теплоухова (26–30 сентября 2005 г.), Москва, МГУЛ, 26–30 сентября 2005 года / под ред. В.Г. Санаева. М.: МГУЛ, 2005. С. 125–127.*
- [25] Оплетав А.С., Залесов С.В. Рост и продуктивность лиственничников после рубок перестройки в березняках Южного Урала // *Аграрный вестник Урала*, 2012. № 4(96). С. 27–28.

Сведения об авторах

Розломий Наталья Геннадьевна [✉] — канд. биол. наук, доцент Института лесного и лесопаркового хозяйства, ФГБОУ ВО «Приморская государственная сельскохозяйственная академия», boss.shino@mail.ru

Минхайдаров Владислав Юрьевич — канд. биол. наук, ФГБОУ ВО «Приморская государственная сельскохозяйственная академия», minh.72@mail.ru

Белов Александр Никитович — канд. с.-х. наук, доцент ФГБОУ ВО «Приморская государственная сельскохозяйственная академия», ФГАОУ ВО Дальневосточный федеральный университет, belka6666@inbox.ru

Хайфэн У — Шэньянский технологический институт № 1, boss.shino@mail.ru

Поступила в редакцию 08.11.2021.

Одобрено после рецензирования 15.02.2022.

Принята к публикации 07.04.2022.

OLGINSKY LARCH (*LARIX OLGENSIS* A. HENRY) CURRENT STATE ON BORISOV PLATEAU (PRIMORSKY REGION)

N.G. Rozlomiya^{1✉}, V.Y. Mirhaydarov¹, A.N. Belov^{1, 2}, Wu Haifeng³

¹Primorsk State Agricultural Academy, 44, Blyukhera av., 692510, Ussuriysk, Russia

²Far Eastern Federal University (FEFU), 10, Ajax, 690922, Russky Island, Vladivostok, Russia

³Shenyang Institute of Technology No. 1, Eastern section of Binhe Road, 113122, prov. Liaoning, Wanhua District, Fushun, China

boss.shino@mail.ru

The modern literature on dendrology recognizes and describes 3 species of larch: Gmelin (Daurian) larch (*L. gmelinii* (Rupr) Rupr), Kayander larch (*L. cajanderi* Mayr.) and Olginsky larch (*Larix olgensis* A. Henry). However, Far Eastern foresters-researchers believe that the Lyubarsky larch, described in 1931 by V.N. Sukachev, grows on the territory of Primorsky Krai. The article presents research data on the current state of the Olginskaya larch (Lyubarsky larch) biogroups on the territory of the Borisov Plateau in Primorsky Krai. The Olginsky larch vegetation area and the grass cover of the territory is described in detail. The characteristics of the stand are given according to taxation indicators: origin, composition divided into stories (by weight and number of trees), age, forest density, average height and diameter, bonus, sum of cross-sectional areas, stock. The measurement results of 100 larch trees (diameter and height) were processed in the Exel STATISTIKA program. The age of the stand was determined, the influence of the average annual temperature and the annual amount of precipitation on the growth of larch in diameter was analyzed. The dynamics of the growth of model trees in diameter is analyzed. It has been established that the Olginskaya larch under the conditions of the Borisov Plateau shows negative growth rates in diameter with a lack and excess of moisture, and also at high temperatures the growth rates decrease. The analysis showed that in the conditions of the Borisov plateau there is a general dependence of the increments in diameter on climatic factors. Larch trees growing in the same micro-conditions showed completely different growth rates, which is obviously explained by genetic differences.

Keywords: larch, Primorsky Krai, increase in diameter, average annual precipitation, average annual temperature

Suggested citation: Rozlomiya N.G., Mirhaydarov V.Y., Belov A.N., Haifeng W. *Sovremennoe sostoyanie listvennitsy ol'ginskoy (Larix olgensis A. Henry) na Borisovskom plato (Primorskiy kray)* [Olginsky larch (*Larix Olgensis* A. Henry) current state on Borisov plateau (Primorsky region)]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 3, pp. 21–28. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-21-28

References

- [1] *Lesnoy kompleks Dal'nego Vostoka Rossii: analiticheskiy obzor* [Forest complex of the Russian Far East: analytical review]. Ed. A.S. Sheingauz. Vladivostok: Khabarovsk: FEB RAN, 2005, 160 p.
- [2] Gukov G.V., Rozlomiya N.G. The larch in the Russian Far East: Decorative and curative properties. *Research J. of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, 2015, v. 6, no. 4, pp. 222–226.
- [3] Zoeo D., Undraa M. *Dinamika fitotsenozov posle rubki ukhoda v psevdotaezhnykh listvennichnykh molodnyakakh* [Dynamics of phytocenoses after thinning in pseudo-taiga larch young stands]. *Problemy botaniki Yuzhnoy Sibiri i Mongolii* [Problems of Botany of South Siberia and Mongolia], 2015, no. 14, pp. 182–184.
- [4] Gukov G.V. *Listvennitsy i listvennichnye lesa rossiysskogo Dal'nego Vostoka* [Larch and larch forests of the Russian Far East]. Vladivostok: Dalnauka, 2008, 365p.
- [5] Bogumil T.A. *Dendroobraz Sibiri: listvennitsa* [Dendro image of Siberia: larch]. *Kul'tura i tekst* [Culture and text], 2021, no. 3(46), pp. 196–204. DOI 10.37386/2305-4077-2021-3-196-204

- [6] Lavrenov M.A. *Sravnitel'nyy analiz izmenchivosti listvennitsy Lyubarskogo s listvennitsey daurskoy i ol'ginskoy* [Comparative analysis of the variability of Lyubarsky larch with Daurian and Olginsky larch]. Aktual'nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa: Materialy XVI Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii [Actual problems of the development of the forest complex: Proceedings of the XVI International Scientific and Technical Conference], Vologda, December 05, 2018. Ed. C.M. Khamitova. Vologda: Vologda State University, 2019, pp. 50–51.
- [7] Gridneva N.V., Gukov G.V., Rozlomiy N.G., Reyf O.Yu. *Reliktovye drevesnye rasteniya Primorskogo kraia i ikh dekorativnye svoystva* [Relic woody plants of Primorsky Krai and their decorative properties]. Vestnik KrasGAU, 2014, no. 12(99), pp. 62–65.
- [8] Sukachev V.N. *O dvukh novykh tsennykh dlya lesnogo khozyaystva drevesnykh porodakh* [About two new tree species valuable for forestry]. Trudy i issledovaniya po lesnomu khozyaystvu i lesnoy promyshlennosti [Proceedings and researches on forestry and forest industry]. Leningrad, 1931, iss. 10, pp. 47–56.
- [9] Dylis N.V. *Listvennitsa Vostochnoy Sibiri i Dal'negο Vostoka. Izmenchivost' i prirodnoe raznoobrazie* [Larch of Eastern Siberia and the Far East]. [Variability and natural diversity]. Moscow: AN SSSR, 1961, 210 p.
- [10] Rozenberg V.A. *Listvennitsa Komarova (komaroviiKolesn.) v yuzhnom Sikhote-Aline* [Komarov larch (komarovii Kolesn.) in the southern Sikhote-Alin]. Komarovskie chteniya [Komarov readings], 1951, iss. 111, pp. 31–43.
- [11] Minkhaydarov V.Yu. *K poznaniyu listvennitsy ol'ginskoy v Primorskom krae* [To the knowledge of the Olginskaya larch in the Primorsky Territory]. Nauka v obrazovatel'nom protsesse vuza: mater. mezhdun. nauchn.-prakt. konf. (v II chastyakh) [Science in the educational process of the university: mater. intl. scientific-practical conf. (in II parts)]. Part II. Ussuriysk, 1997, pp. 24–26.
- [12] Urusov V.M. *Gibridizatsiya v prirodnoy flore Dal'negο Vostoka i Sibiri (prichiny i perspektivy ispol'zovaniya)* [Hybridization in the natural flora of the Far East and Siberia (reasons and prospects for use)]. Vladivostok: Dal'nauka, 2002, 229 p.
- [13] Urusov V.M., Lobanova I.I., Varchenko A.I. Urusov V.M., Lobanova I.I., Varchenko A.I. *Khvoynye derev'ya i kustarniki rossiyskogo Dal'negο Vostoka. Geografiya i ekologiya* [Coniferous trees and shrubs of the Russian Far East. Geography and ecology]. Vladivostok: Dal'nauka, 2004, 111 p.
- [14] *Lesoustroitel'naya instruktsiya. Prikaz Federal'nogo agentstva lesnogo khozyaystva* [Forest management instruction. Order of the Federal Forestry Agency] May 12, 2020, no. 122. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/542621790> (accessed 15.09.2021).
- [15] Gavrilova O.I., Yur'eva A.L. *Osobennosti rosta lesnykh kul'tur listvennitsy sibirskoy v usloviyakh Respubliki Kareliya* [Features of the growth of Siberian larch forest cultures in the conditions of the Republic of Karelia]. Khvoynye boreal'noy zony [Coniferous boreal zone], 2014, v. 32, no. 5–6, pp. 23–28.
- [16] Vernodubenko V.S., Polyagoshko V.A., Gibov I.A. *Rezultaty dendroklimaticeskogo analiza rosta listvennitsy v gorode Vologda* [Results of dendroclimatic analysis of larch growth in the city of Vologda]. Rol' agrarnoy nauki v ustoychivom razvitiy sel'skikh territoriy: Sbornik V Vserossiyskoy (natsional'noy) nauchnoy konferentsii [The role of agricultural science in the sustainable development of rural areas: Collection of the V All-Russian (national) scientific conference], Novosibirsk, December 18, 2020. Novosibirsk: Publishing Center of the Novosibirsk State Agrarian University «Zolotoy Kolos», 2020, pp. 148–151.
- [17] Kovylyina O.P., Kovylin N.V. *Osobennosti raspredeleniya derev'ev listvennitsy po diametru i vysote v zashchitnykh nasazhdeniyakh Khakasii* [Features of the distribution of larch trees by diameter and height in protective plantations of Khakassia]. Vestnik KrasGAU, 2008, no. 3, pp. 194–198.
- [18] Koryakin V.N., Didichenko Yu.V., Romanova N.V. *Rost smeshannykh lesnykh kul'tur listvennitsy i kedra koreyskogo v Birobidzhanskom lesnichestve* [The growth of mixed forest cultures of larch and Korean pine in the Birobidzhan forestry]. Prirodnye resursy i ekologiya Dal'nevostochnogo regiona: Materialy Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo foruma [Natural resources and ecology of the Far East region: Proceedings of the International Scientific and Practical Forum], Khabarovsk, October 25–26, 2012. Khabarovsk: Pacific State University, 2013, pp. 105–106.
- [19] Milyutina Yu.A., Karaseva M.A., Karasev V.N. *Diagnostika sostoyaniya nasazhdeniy listvennitsy sibirskoy v gorodskikh usloviyakh* [Diagnosis of the state of Siberian larch plantations in urban conditions]. Nauchnomu progressu — tvorchestvo molodykh: materialy IX mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii po estestvennonauchnym i tekhnicheskim distsiplinam [Scientific progress — the work of the young: materials of the IX International Youth Scientific Conference on Natural Science and Technical Disciplines], in 3 parts, Yoshkar-Ola, April 18–19, 2014. Yoshkar-Ola: Volga State Technological University, 2014, pp. 40–42.
- [20] Nikolaev A.N., Fedorov P.P. *Vliyanie temperaturnogo rezhima pochvy na radial'nyy prirost stvolov listvennitsy i sosny v Tsentral'noy Yakutii* [Influence of soil temperature regime on the radial growth of larch and pine trunks in Central Yakutia]. Ekologo-botanicheskie issledovaniya v Yakutii [Ecological and botanical research in Yakutia]. Yakutsk: NIPC Sakhapoliographizdat, 2004, pp. 67–73.
- [21] Nikolaev A.N., Fedorov P.P. Nikolaev A.N., Ugarov I.S. *Razlichiya rezhima vvlazhneniya merzlotnykh landshaftov Tsentral'noy Yakutii i ego vliyanie na rost listvennitsy* [Differences in the moistening regime of permafrost landscapes in Central Yakutia and its influence on the growth of larches]. Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2011, v. 13, no. 1–4, pp. 1016–1019.
- [22] Rozlomiy N.G., Shelud'ko A.P. *Kharakteristika sostoyaniya kul'tur sosny i listvennitsy na territorii Ussuriyskogo filiala KGKU «Primorskoe lesnichestvo»* [Characteristics of the state of pine and larch crops on the territory of the Ussuriysk branch of the Primorskoye forestry enterprise]. Integratsionnye protsessy mirovogo nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya: sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Integration processes of world scientific and technological development: a collection of scientific papers based on the materials of the International Scientific and Practical Conference], in 2 parts, Belgorod, November 29, 2017. Ed. E.P. Tkacheva. Belgorod: Limited Liability Company «Agency for Advanced Scientific Research», 2017, pp. 48–51.

- [23] Klyuchnikov M.V., Malenko A.A. *Rost kul'tur listvennitsy v srednegor'ye Altaya* [The growth of larch crops in the middle mountains of Altai]. Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of the Altai State Agrarian University], 2009, no. 6(56), pp. 31–34.
- [24] Mel'nik P.G., Karasev N.N. *Rost razlichnykh vidov listvennitsy v Podmoskov'e* [The growth of various types of larch in the Moscow region]. Lesa Evrazii — Ural'skie gory: materialy V Mezhdunarodnoy konferentsii molodykh uchenykh, posvyashchennoy 175-letiyu pervogo lesoustroystva na Urale i 160-letiyu so dnya rozhdeniya lesovoda F.A. Teploukhova [Forests of Eurasia — the Ural Mountains: materials of the V International Conference of Young Scientists dedicated to the 175th anniversary of the first forest management in the Urals and the 160th anniversary of the birth of the forester F.A. Teploukhov], Moscow, MSFU, September 26–30, 2005. Ed. V.G. Sanaev. Moscow: MGUL, 2005, pp. 125–127.
- [25] Opletaev A.S., Zalesov S.V. *Rost i produktivnost' listvennichnikov posle rubok pereformirovaniya v bereznyakakh Yuzhnogo Urala* [Growth and productivity of larch forests after re-cutting in the birch forests of the Southern Urals]. Agrarnyy vestnik Urala [Agrarian Bulletin of the Urals], 2012, no. 4 (96), pp. 27–28.

Authors' information

Rozlomiya Natal'ya Gennad'evna✉ — Cand. Sci. (Biology), Associate Professor, Primorsk State Agricultural Academy, boss.shino@mail.ru

Minkhaydarov Vladislav Yur'evich — Cand. Sci. (Biology), Primorsk State Agricultural Academy, minh.72@mail.ru

Belov Aleksandr Nikitovich — Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor of the, Primorsk State Agricultural Academy, Far Eastern Federal University (FEFU), belka6666@inbox.ru

Khayfen Wu — Shenyang Institute of Technology No. 1, boss.shino@mail.ru

Received 08.11.2021.

Approved after review 15.02.2022.

Accepted for publication 07.04.2022.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

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

The authors declare that there is no conflict of interest

ПИГМЕНТАЦИЯ ЛИСТОВЫХ ПЛАСТИН ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ РОДА БЕРЕЗА (*BETULA* L.)

Р.Н. Бабаев^{1,2}, Н.Н. Бессчетнова¹, В.П. Бессчетнов¹✉

¹Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия, 603107, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 97

²Союз лесовладельцев Нижегородской области, 603005, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, д. 9

lesfak@bk.ru

Проведена сравнительная оценка различных видов, входящих в таксономическую систему рода береза (*Betula* L.), по содержанию пигментов в листовом аппарате. Определено содержание пигментов, участвующих в фотосинтезе, методом спектрофотометрического анализа. Проведена оценка концентрации пигментов по оптической плотности вытяжки из измельченной листовой пластины в 96%-м этаноле. Установлено, что пигментный состав листового аппарата различных видов и форм березы определен генотипическими и фенотипическими особенностями. Изучаемые образцы внутри вида показали более сдержанный характер по разнице пигментного состава по отношению к межвидовому соотношению в июне. Однако при учете тех же исследуемых признаков в июле и августе их сдержанность наблюдалась также между видами и формами. Наследственный и адаптационный характер по содержанию фотосинтетических пигментов листового аппарата позволяет рассматривать указанный показатель как один из идентификационных признаков при селекционной инвентаризации и ревизии ассортиментного состава селекционно-семеноводческих объектов. Принимая во внимание успешность произрастания б. повислой на территории Нижегородской обл., следует, что б. карельская подходит для внедрения в состав вновь создаваемых насаждений, так как опыты подчеркивают ее ярко выраженное сходство с аборигенным видом.

Ключевые слова: береза, листовый аппарат, пигментный состав, хлорофилл, каротиноиды

Ссылка для цитирования: Бабаев Р.Н., Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П. Пигментация листовых пластин представителей рода береза (*Betula* L.) // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 3. С. 29–38. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-29-38

Повышение продуктивности и улучшение породного состава лесов на землях различного целевого назначения является одним из приоритетных направлений стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 г. Представители рода береза (*Betula* L.) широко распространены в умеренном климате Северного полушария, а их устойчивость к биотическим и абиотическим факторам, ценные свойства древесины и различные средообразующие функции определяют ее экологическую, хозяйственную и экономическую значимость [1–5]. Пигментный состав листового аппарата вполне справедливо относят к важнейшим биологическим характеристикам древесных видов, связанным с режимом фотосинтеза, продуктивностью и адаптивностью [6–12]. Обоснованно признается его защитная роль: присутствие хлорофилла и каротиноидов усиливает резистентность растений [13, 14]. Динамику пигментного состава считают адаптивной реакцией на условия освещенности [15–20].

Цель работы

Цель работы — получение сравнительной оценки различных видов, входящих в таксоно-

мическую систему рода береза, по степени содержания хлорофилла и каротиноидов в листовых пластинках, определение максимальной схожести пигментного состава относительно аборигенного вида — березы повислой.

Материалы и методы

Объектами исследований служили виды и формы представителей рода береза (*Betula* L.), сосредоточенные в Ботаническом саду ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского». В состав растительности ботанического сада входит 1 аборигенный вид — береза повислая (*Betula pendula* Roth.) и 9 интродуцированных видов и форм: береза повислая Юнга (*Betula pendula Youngii* (Th. Moore) Schneid.); береза повислая пурпурная (*Betula pendula purpurea* (Andre) Schneid.); береза Эрмана, или береза каменная (*Betula Ermanii* Cham.); береза карельская (*Betula pendula* var. *carelica* Merckl.); береза даурская, или береза черная (*Betula dahurica* Pall.); береза вишневая (*Betula lenta* L.); береза белая китайская (*Betula albosinensis* Burk.); береза полусердцевидная (*Betula subcordata* (Rydb.) Sarg.); береза Радде (*Betula Raddeana* Trautv.).

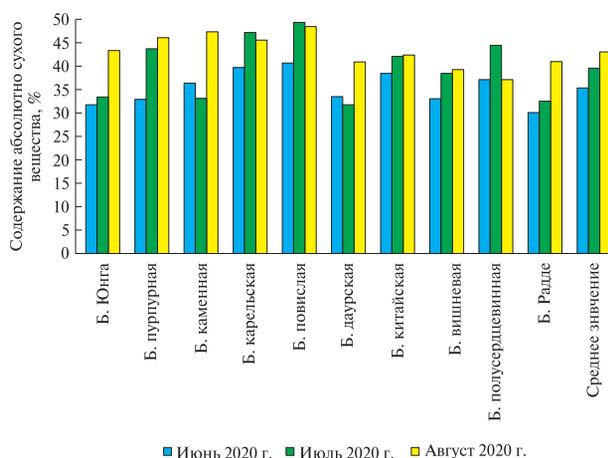


Рис. 1. Сравнительная диаграмма видов и форм березы по содержанию абсолютно сухого вещества в листовом аппарате в 2020 г.

Fig. 1. Comparative diagram of birch species and forms according to the content of absolutely dry matter in the leaf apparatus in 2020

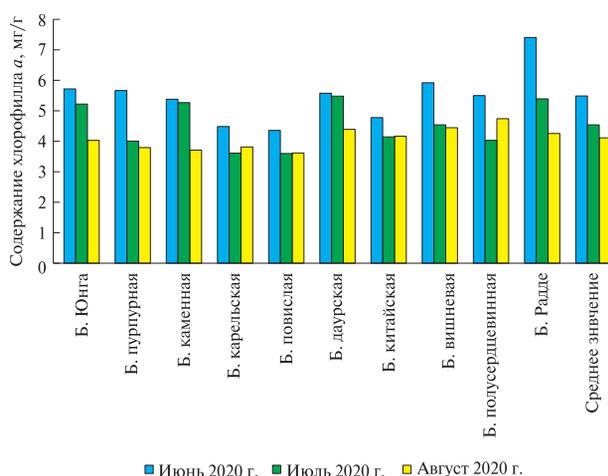


Рис. 2. Сравнительная диаграмма видов и форм березы по динамике содержания хлорофилла *a* в листовом аппарате в 2020 г.

Fig. 2. Comparative diagram of birch species and forms according to the dynamics of chlorophyll *a* content in the leaf apparatus in 2020

Исследования по определению содержания пластидных пигментов в листовом аппарате проводили согласно общепринятым методикам [21–35].

Определение содержания пигментов, участвующих в фотосинтезе, реализовано традиционными методами в ходе камерального этапа исследований. Вполне результативным и достаточно точным методом исследования пигментного состава листового аппарата признан спектрофотометрический анализ [21, 24, 25, 27, 28, 30–35]. С его помощью проведена оценка концентрации пигментов по оптической плотности вытяжки из измельченной листовой пластины в 96%-м

этаноле. Опыт повторяли ежемесячно в период с июня по август 2020 г. Побеги исследуемых видов для отбора листовых пластин заготавливали в дневные часы одновременно и равномерно с хорошо освещенных участков среднего яруса кроны. С каждого учетного дерева было срезано по три побега. Лабораторный анализ выполнен в аналитической лаборатории ФГБОУ ВО «Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия». Далее проводили нарезку и взвешивание листовых пластин массой 1 г на электронных весах Acculab vicon vic-300d3 с точностью до 0,001 г. Следующим этапом работ послужило измельчение, перемалывание в муку полученных навесок в фарфоровых ступках. Измельчение выполнено вручную с добавлением крошки стекла и карбоната кальция CaCO_3 для нейтрализации клеточного сока. Полученную массу через два слоя фильтровальной бумаги переносили в мерные стаканы объемом 50 мл, а ступку тщательно промывали и ополаскивали этанолом. В целях предотвращения разрушения хлорофилла работы проводились в темном помещении. Полученную массу помещали отстаиваться в темный шкаф на 1–2 ч. После отстаивания полученный экстракт переносили в кварцевые кюветы объемом 4 мл и длиной оптического пути 10 мм, после чего кювету экстрактом и контрольную кювету с 96%-м этанолом помещали в спектрофотометр СФ-2000 с программным обеспечением GRASS GIS 7.6.1 / QGIS 3.4, позволяющим строить на мониторе компьютера спектры поглощения и фиксировать их максимумы. Оценку давали при длинах волн: 665 нм (хлорофилл *a*), 649 нм (хлорофилл *b*), 452,5 нм (каротиноиды). Содержание хлорофилла *a*, хлорофилла *b*, каротиноидов и их суммарное количество вычисляли по соответствующим уравнениям Ветштейна и Хольма для 96%-го раствора этанола [21, 25, 27, 28, 30–36].

Для перерасчета содержания анализируемых пигментов листового аппарата на единицу сухого вещества определяли его наличие в каждой навеске листовых пластин после высушивания до абсолютно сухого состояния в лабораторных сушильных шкафах HS 61 А. Обработка полученных данных осуществлялась в электронных таблицах Excel [37].

Результаты и обсуждение

Содержание абсолютно сухого вещества в листовом аппарате различных видов и форм березы свидетельствуют о том, что наибольшее содержание влаги приходится на июнь — 69,92 %, наименьшее — на июль и август, по 50,32 и 51,36 % соответственно (рис. 1). Полученные результаты свидетельствуют о том, что увеличение

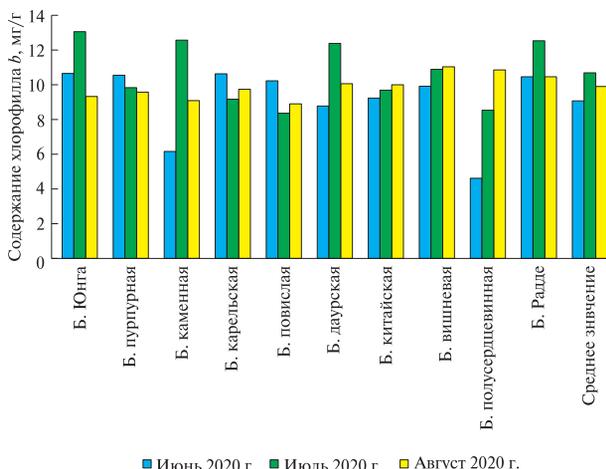


Рис. 3. Сравнительная диаграмма видов и форм березы по динамике содержания хлорофилла *b* в листовом аппарате в 2020 г.

Fig. 3. Comparative diagram of birch species and forms according to the dynamics of chlorophyll *b* content in the leaf apparatus in 2020

доли сухого вещества связано непосредственно с уменьшением светового дня, следовательно, со снижением продолжительности активной фазы фотосинтеза.

По результатам наблюдений установлены заметные различия пигментного состава листового аппарата деревьев представителей рода береза при выращивании на выровненном экотоне в динамике за три летних месяца. По содержанию хлорофилла *a* в листовом аппарате наибольшее его среднее значение отмечается в июне, при самом высоком результате у б. Радде $7,38 \pm 0,25$ мг/г, а наименьший — у б. повислой, аборигенного вида, $4,31 \pm 0,11$ мг/г. Наименьшее среднее значение в подавляющем большинстве случаев приходится на август — от $3,55 \pm 0,05$ мг/г у б. повислой до $4,71 \pm 0,14$ мг/г у б. полусердцевидной. Однако самый минимум по содержанию хлорофилла *a* приходится на июль для б. повислой — $3,53 \pm 0,05$ мг/г (рис. 2).

По содержанию хлорофилла *b* в листовом аппарате, в целом по опыту, наибольшее среднее значение достигнуто в июле — $10,55 \pm 0,21$ мг/г, а наименьшее — в июне, $8,98 \pm 0,26$ мг/г. При этом самый минимум хлорофилла *b* зафиксирован у б. полусердцевидной — $4,48 \pm 0,11$ мг/г (срок учета июнь), а максимум — б. Юнга, $12,90 \pm 0,43$ мг/г (срок учета июль). В августе все исследуемые виды и формы в той или иной степени имели среднее значение, которое составляло $9,75 \pm 0,11$ мг/г (рис. 3).

Содержание каротиноидов имеет следующие показатели: максимум значений приходится на б. полусердцевидную — $1,78 \pm 0,14$ мг/г (срок учета июнь), минимум — на б. карельскую, $0,61 \pm 0,02$ мг/г (срок учета июль). Максимум каротиноидов в подавляющем большинстве

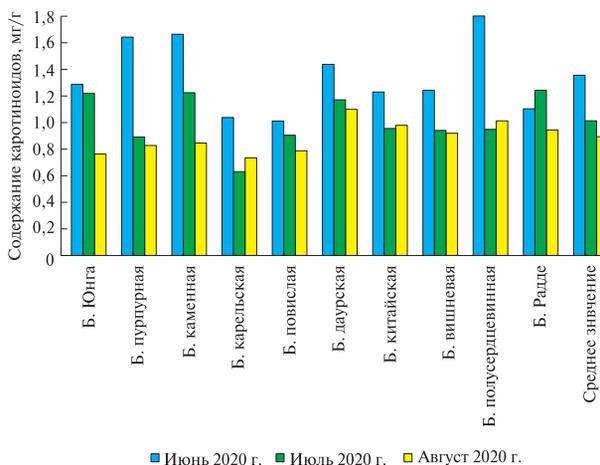


Рис. 4. Сравнительная диаграмма видов и форм березы по содержанию каротиноидов в листовом аппарате в 2020 г.

Fig. 4. Comparative diagram of birch species and forms according to the content of carotenoids in the leaf apparatus in 2020

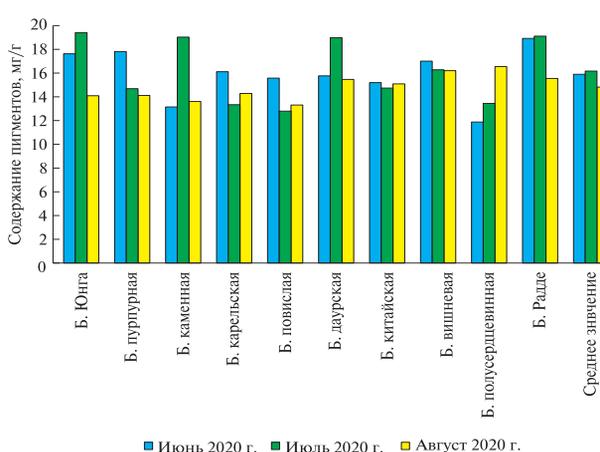


Рис. 5. Сравнительная диаграмма видов и форм березы по суммарному содержанию пигментов в листовом аппарате в 2020 г.

Fig. 5. Comparative diagram of birch species and forms by the total content of pigments in the leaf apparatus in 2020

случаев приходится на июнь. Минимум варьирует между июлем и августом. Однако средние значения в целом по опыту показывают динамику снижения содержания каротиноидов от июня к августу (рис. 4).

По суммарному содержанию всех учитываемых пигментов в листовом аппарате минимум показателя зафиксирован у б. полусердцевидной — $11,70 \pm 0,23$ мг/г (срок учета июнь), максимум — у б. Юнга, $19,23 \pm 0,66$ мг/г (срок учета июль) (рис. 5).

Существенность обнаруженных различий между исследуемыми видами и формами березы по исследуемым признакам пигментного состава листьев подтвердил однофакторный дисперсионный анализ (табл. 1).

**Оценки существенности различий между видами рода береза
по пигментному составу листового аппарата**

**Estimates of the significance of differences between species of the genus birch
by the pigment composition of the leaf apparatus**

Признак	Критерий Фишера $F_{оп}$	Доля влияния фактора ($h^2 \pm s_h^2$)				Критерии различий	
		по Плохинскому		по Снедекору		НСР ₀₅	D_{05}
		h^2	$\pm s_h^2$	h^2	$\pm s_h^2$		
Срок учета — июнь 2020							
1	29,69	0,7696	0,0259	0,7612	0,0269	0,443	0,800
2	15,84	0,6405	0,0404	0,6224	0,0425	1,459	2,632
3	7,66	0,4629	0,0604	0,4254	0,0646	0,276	0,498
4	15,24	0,6316	0,0414	0,6128	0,0436	1,527	2,755
5	17,71	0,6658	0,0376	0,6499	0,0394	2,365	4,267
Срок учета — июль 2020							
1	55,92	0,8628	0,0154	0,8592	0,0158	0,279	0,503
2	29,93	0,7710	0,0258	0,7627	0,0267	0,920	1,659
3	17,91	0,6684	0,0373	0,6527	0,0391	0,129	0,232
4	41,10	0,8222	0,0200	0,8167	0,0206	1,175	2,119
5	61,95	0,8745	0,0141	0,8713	0,0145	2,345	4,231
Срок учета — август 2020							
1	19,63	0,6883	0,0351	0,6743	0,0366	0,233	0,420
2	6,75	0,4315	0,0640	0,3898	0,0687	0,751	1,355
3	9,89	0,5266	0,0533	0,4968	0,0566	0,103	0,187
4	9,91	0,5272	0,0532	0,4976	0,0565	0,998	1,801
5	19,28	0,6844	0,0355	0,6701	0,0371	2,333	4,209

Примечание. Здесь и далее: 1 — содержание хлорофилла *a*; 2 — содержание хлорофилла *b*; 3 — содержание каротиноидов; 4 — суммарное содержание пигментов; 5 — содержание абсолютно сухого вещества; $F_{оп}$ — опытный критерий Фишера; h^2 — доля влияния организованного фактора; $\pm s_h^2$ — ошибка доли влияния организованного фактора; НСР₀₅ — наименьшая существенная разность; D_{05} — критерий Тьюки.

Различия между сравниваемыми представителями рода береза (экзотами и аборигенами) в пределах опытного участка оказались существенными и достоверными по всем исследуемым признакам. Значения опытного критерия Фишера превосходят соответствующие табличные величины на 5%-м и на 1%-м уровне значимости ($F_{05/01} = 1,97/2,59$).

Доля влияния организованных факторов, определенных в нашем случае принадлежностью к тому или иному виду и форме березы, при оценках составляла от $43,15 \pm 6,40$ % по методу Плохинского и $38,98 \pm 6,87$ % по методу Снедекора (признак 2, срок учета — август 2020) до $87,45 \pm 1,41$ % по методу Плохинского и $87,13 \pm 1,45$ % по методу Снедекора (признак 5, срок учета — июль 2020). Полученный результат свидетельствует о заметной генотипической обусловленности различий между исследуемыми видами и формами березы по их пигментному составу.

Достигнутые оценки соответствуют представлению о выровненности условий произрастания видов на территории Ботанического сада и минимизации в соответствии с этим влияния внешних факторов на дифференциацию анализируемых растений по учитываемым признакам.

Эффективность раздельного действия каждого из организованных факторов установлена по двухфакторному иерархическому дисперсионному анализу (табл. 2).

Влияние организованного фактора высшей иерархии (фактор *A*) не во всех случаях превышает значения критерия Фишера на 5 %-м и 1 %-м уровнях значимости ($F_{05/01} = 2,39/3,45$). В июне опытные значения критерия Фишера меньше табличных значений по содержанию каротиноидов — 2,27 (признак 3). В июле данное явление не проявляется, а в августе значение опытного критерия Фишера превосходит табличное значение на 1%-м уровне значимости по содержанию хлорофилла *b* и содержанию каротиноидов (2,50 и 3,25 соответственно).

Влияние организованного фактора низшей иерархии (фактор *B*) оказалось достоверным и превышало табличные значения критерия Фишера ($F_{05/01} = 1,75/2,20$) в двух периодах учета: в июне и августе. В июле влияние фактора *B* оказалось недостоверным по двум признакам: содержанию хлорофилла *a* — 1,59 (меньше 5%-го и 1%-го уровня значимости); содержанию абсолютно сухого вещества — 1,92 (меньше 1%-го уровня значимости).

Т а б л и ц а 2

Двухфакторный дисперсионный анализ по пигментному составу листового аппарата
Two-factor dispersion analysis on the pigment composition of the leaf apparatus

Признак	Источник дисперсии	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	$\pm s_h^2$
Срок учета — июнь 2020						
1	Виды (A)	10,84	0,7696	0,0346	0,7316	0,0403
	Деревья (B)	6,51	0,1577	0,2808	0,1738	0,2754
	Остаток (Z)	—	0,0727	0,9273	0,0946	0,9054
2	Виды (A)	6,18	0,6405	0,0539	0,5925	0,0611
	Деревья (B)	5,34	0,2301	0,2566	0,2409	0,2530
	Остаток (Z)	—	0,1294	0,8706	0,1666	0,8334
3	Виды (A)	2,27	0,4629	0,0806	0,3958	0,0906
	Деревья (B)	16,40	0,4540	0,1820	0,5057	0,1648
	Остаток (Z)	—	0,0830	0,9170	0,0985	0,9015
4	Виды (A)	6,19	0,6316	0,0553	0,5847	0,0623
	Деревья (B)	4,80	0,2266	0,2578	0,2319	0,2560
	Остаток (Z)	—	0,1418	0,8582	0,1833	0,8167
5	Виды (A)	8,00	0,6658	0,0501	0,6262	0,0561
	Деревья (B)	3,72	0,1850	0,2717	0,1777	0,2741
	Остаток (Z)	—	0,1492	0,8508	0,1960	0,8040
Срок учета — июль 2020						
1	Виды (A)	40,34	0,8628	0,0206	0,8543	0,0219
	Деревья (B)	1,59	0,0475	0,3175	0,0240	0,3253
	Остаток (Z)	—	0,0896	0,9104	0,1217	0,8783
2	Виды (A)	13,20	0,7710	0,0343	0,7408	0,0389
	Деревья (B)	3,93	0,1298	0,2901	0,1280	0,2907
	Остаток (Z)	—	0,0991	0,9009	0,1311	0,8689
3	Виды (A)	8,88	0,6684	0,0497	0,6327	0,0551
	Деревья (B)	3,05	0,1672	0,2776	0,1492	0,2836
	Остаток (Z)	—	0,1644	0,8356	0,2181	0,7819
4	Виды (A)	22,35	0,8222	0,0267	0,8041	0,0294
	Деревья (B)	2,55	0,0817	0,3061	0,0668	0,3111
	Остаток (Z)	—	0,0961	0,9039	0,1291	0,8709
5	Виды (A)	39,75	0,8745	0,0188	0,8648	0,0203
	Деревья (B)	1,92	0,0489	0,3170	0,0316	0,3228
	Остаток (Z)	—	0,0766	0,9234	0,1036	0,8964
Срок учета — август 2020						
1	Виды (A)	9,15	0,6883	0,0468	0,6520	0,0522
	Деревья (B)	3,47	0,1672	0,2776	0,1572	0,2809
	Остаток (Z)	—	0,1445	0,8555	0,1908	0,8092
2	Виды (A)	2,50	0,4315	0,0853	0,3712	0,0943
	Деревья (B)	6,21	0,3834	0,2055	0,3992	0,2003
	Остаток (Z)	—	0,1851	0,8149	0,2297	0,7703
3	Виды (A)	3,25	0,5266	0,0710	0,4643	0,0804
	Деревья (B)	9,49	0,3597	0,2134	0,3958	0,2014
	Остаток (Z)	—	0,1137	0,8863	0,1399	0,8601
4	Виды (A)	3,76	0,5272	0,0709	0,4707	0,0794
	Деревья (B)	5,82	0,3119	0,2294	0,3262	0,2246
	Остаток (Z)	—	0,1609	0,8391	0,2031	0,7969
5	Виды (A)	8,93	0,6844	0,0473	0,6476	0,0529
	Деревья (B)	3,51	0,1702	0,2766	0,1607	0,2798
	Остаток (Z)	—	0,1453	0,8547	0,1917	0,8083

Примечание. Факторы влияния: A — организованный фактор высшей иерархии, действие которого связано с различиями между видами и формами; B — организованный фактор низшей иерархии, действие которого связано с различиями между учетными деревьями; Z — остаточная дисперсия (остаток) или случайное влияние не учитываемых в опыте факторов среды.

Характеристики пигментного состава листового аппарата различных видов и форм березы неодинаково восприимчивы к воздействию комплекса факторов среды. Остаточная дисперсия (фактор Z), возникающая под их влиянием, оказалась неравномерной: от 7,27 % в июне (признак 1) до 18,51 % в августе (признак 2).

Выводы

Пигментный состав листового аппарата разных видов и форм березы определен генотипическими и фенотипическими особенностями. Изучаемые образцы внутри вида показали более сдержанный характер по разнице показателей по отношению к межвидовому соотношению в июне. Однако при учете тех же показателей в июле и августе сдержанность показателей наблюдалась также между видами и формами.

Наследственный и адаптационный характер содержания фотосинтетических пигментов листового аппарата позволяет рассматривать указанную характеристику как один из идентификационных признаков при селекционной инвентаризации и ревизии ассортимента состава селекционно-семеноводческих объектов. Для оценки и обоснования селекционных качеств определенных видов, рекомендуемых для включения в состав вновь создаваемых насаждений в виде испытательных лесных культур, целесообразно использовать показатели содержания и баланса хлорофилла и каротиноидов в листовом аппарате как индикаторы их повышенной фотосинтетической активности.

Принимая во внимание успешность произрастания б. повислой на территории Нижегородской обл., следует, что б. карельская подходит для внедрения в состав вновь создаваемых насаждений, так как из опытов подчеркивается ее ярко выраженное сходство с аборигенным видом.

Список литературы

- [1] Захаров А.Б., Бессчетнов В.П. Аномалии ветвления березы (*Betula*) в защитных лесных полосах автомагистралей // ИВУЗ Лесной журнал, 2019. № 5. С. 95–104. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.95
- [2] Бабаев Р.Н. Содержание крахмала в тканях побегов разных видов березы в условиях интродукции // Рост и воспроизводство научных кадров в АПК: Сб. трудов по итогам Российской национальной науч.-практ. интернет-конференции для обучающихся и молодых ученых, Нижний Новгород, 19–20 декабря 2019 года / под ред. Н.Н. Бессчетновой. — Нижний Новгород: Изд-во Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии, 2020. С. 74–78.
- [3] Бабаев Р.Н. Сравнительная морфология листовых пластинок березы карельской и березы повислой на территории Нижегородской области // Современное лесное хозяйство — проблемы и перспективы: Материалы Всерос. науч.-практ. конф., посвященной 50-летию «ВНИИЛП ИСБиотех», Воронеж, 3–4 декабря 2020 года. Воронеж: Изд-во ВНИИЛП ИСБиотех, 2020. С. 22–25.
- [4] Бабаев Р.Н., Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П. Лигнификация ксилемы разных видов березы при интродукции в условиях Нижегородской области // Изв. Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2021. № 235. С. 40–56. DOI 10.21266/2079-4304.2021.235.40-56
- [5] Zhao Xi-yang, Bian Xiu-yan, Li Zhi-xin, Wang Xiewei, Chehg-jun Yang, Liu Gui-feng, Jiang Jing, Kentbayev Y., Kentbayeva B., Yang Chuan-ping Genetic stability analysis of introduced *Betula pendula*, *B. kirghisorum*, and *Betula pubescens* families in saline-alkali soil of northeastern China // Scandinavian Journal of Forest Research, 2014, no. 4, 26 p.
- [6] Кундзиньш А.В., Игаунис Г.А., Гайлис Я.Я., Пирагс Д.М., Роне В.М., Ронис Э.Я., Сарма В.П., Смилга Я.Я. Лесная селекция. М.: Лесная пром-сть, 1972. 200 с.
- [7] Озолина И.А., Мочалкин А.И. Роль пигментов в защитно-приспособительных реакциях растений // Изв. АН СССР. Сер. Биол., 1972. № 1. С. 96–102.
- [8] Ходасевич Э.В. Фотосинтетический аппарат хвойных. Минск: Наука и техника, 1982. С. 199.
- [9] Воронин П.Ю., Ефимцев Е.И., Васильев А.А., Ватковский О.С., Мокронос А.Т. Проектное содержание хлорофилла и биоразнообразие растительности основных ботанико-географических зон России // Физиология растений, 1995. Т. 42. № 2. С. 295–302.
- [10] Тужилкина В.В., Бобкова К.С., Мартынюк З.П. Хлорофилльный индекс и ежегодный фотосинтетический сток углерода в хвойные фитоценозы на европейском севере России // Физиология растений, 1998. Т. 45. № 4. С. 594–600.
- [11] Тужилкина В.В. Проектное содержание хлорофилла в коренных еловых фитоценозах // Вестник Института биологии Коми НЦ УрО РАН, 2009. № 4. С. 30–32.
- [12] Фомин В.В., Шавин С.А., Марина Н.В., Новоселова Г.Н. Неспецифическая реакция фотосинтетического аппарата хвой сосны на действие агропромышленных загрязнений и затенения // Физиология растений, 2001. Т. 48. № 5. С. 760–765.
- [13] Моссэ И.Б., Молофей В.П., Кострова Л.Н. Развитие идеи Н.И. Вавилова о защитной роли пигментов в генетических экспериментах // Селекция, генетические ресурсы и сохранение генофонда лесных древесных растений (Вавиловские чтения): сб. науч. трудов Института леса НАН Беларуси, 2003. Вып. 59. С. 220–223.
- [14] Peguero-Pina J.J., Morales F., Gil-Pelegrin E. Frost Damage in *Pinus sylvestris* L. Stems Assessed by Chlorophyll Fluorescence in Cortical Bark Chlorenchyma // Annals of Forest Science, 2008, v. 65(8), pp. 813p1–813p6. DOI: 10.1051/forest:2008068
- [15] Niinemets Ü. Acclimation to Low Irradiance in *Picea abies*: Influences of Past and Present Light Climate on Foliage Structure and Function // Tree Physiology, 1997, v. 17, iss. 11, pp. 723–732. DOI: 10.1093/treephys/17.11.723
- [16] Niinemets Ü. Stomatal Conductance Alone Does not Explain the Decline in Foliar Photosynthetic Rates with Increasing Tree Age and Size in *Picea abies* and *Pinus sylvestris* // Tree Physiology, 2002, v. 22, iss. 8, pp. 515–535. DOI: 10.1093/treephys/22.8.515
- [17] Bouvier F., Backhaus R.A., Camara B. Induction and Control of Chloroplast Specific Carotenoid Genes by Oxidative Stress // J. of Biological Chemistry, 1998, v. 273, no. 46, pp. 30651–30659. DOI: 10.1074/jbc.273.46.30651
- [18] Skuodiene L. Quantitative Changes in Aminoacid Proline and Chlorophyll in the Needles of *Picea abies* Karst. (L.) during Stress and Adaptation // Biologija, 2001, no. 2, pp. 54–56.

- [19] Porcar-Castell A., Juurola E., Ensminger I., Berninger F., Hari P., Nikinmaa E. Seasonal Acclimation of Photosystem II in *Pinus sylvestris*. II. Using the Rate Constants of Sustained Thermal Energy Dissipation and Photochemistry to Study the Effect of the Light Environment // *Tree Physiology*, 2008, v. 28, iss. 10, pp. 1483–1491. DOI: 10.1093/treephys/28.10.1483
- [20] Porcar-Castell A., Juurola E., Ensminger I., Berninger F., Hari P., Nikinmaa E. Seasonal Acclimation of Photosystem II in *Pinus sylvestris*. I. Estimating the Rate Constants of Sustained Thermal Energy Dissipation and Photochemistry // *Tree Physiology*, 2008, v. 28, iss. 10, pp. 1475–1482. DOI: 10.1093/treephys/28.10.1475
- [21] Lichtenthaler H.K. Chlorophyll a and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes // *Methods in Enzymology: Plant Cell Membranes*, 1987, v. 148, pp. 350–382.
- [22] Lichtenthaler, H.K. Chlorophylls and Carotenoids: Measurement and Characterization by UV-VIS Spectroscopy // *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*, 2001, unit F4.3, pp. F4.3.1–F4.3.
- [23] Lichtenthaler H.K. Biosynthesis and Accumulation of Isoprenoid Carotenoids and Chlorophylls and Emission of Isoprene by Leaf Chloroplasts // *Bulletin of the Georgian National Academy of sciences*, 2009, v. 3, no. 3, pp. 81–94.
- [24] Porra R.G., Thomson W.A., Kriedemann P.E. Determination of accurate extinction coefficients and simultaneous equations for assaying chlorophylls a and b extracted with four different solvents: verification of the concentration of chlorophyll standards by atomic absorption spectroscopy // *Biochimica et Biophysica Acta*, 1989, v. 975, pp. 384–394.
- [25] Wellburn A.R. The Spectral Determination of Chlorophylls a and b, as well as Total Carotenoids, Using Various Solvents with Spectrophotometers of Different Resolution // *J. of plant physiology*, 1994, v. 144, iss. 3, pp. 307–313.
- [26] Rosenthal S.I., Camm E.L. Photosynthetic decline and pigment loss during autumn foliar senescence in western larch (*Larix occidentalis*) // *Tree Physiology*. Victoria, Canada: Heron Publishing, 1997, v. 17 (12), pp. 767–775.
- [27] Бессчетнова Н.Н. Содержание основных пигментов в хвое плюсовых деревьев сосны обыкновенной // *Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник*, 2010. № 6 (75). С. 4–10.
- [28] Бессчетнова Н.Н. Пигментный состав хвои плюсовых деревьев сосны обыкновенной в архивах клонов // *Труды факультета лесного хозяйства Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии*. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии, 2011. № 1 (1). С. 56–65.
- [29] Miazek K., Ledakowicz S. Chlorophyll extraction from leaves, needles and microalgae: A kinetic approach // *International J. of Agricultural and Biological Engineering*, 2013, v. 6, no. 2, pp. 107–115.
- [30] Бессчетнова Н.Н. Многомерная оценка плюсовых деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) по показателям пигментного состава хвои // *Вестник Марийского государственного технического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование*, 2013. № 1 (17). С. 5–14.
- [31] Бессчетнова Н.Н. Индекс неидентичности в селекционной оценке плюсовых деревьев // *Вестник Саратовского государственного университета им. Н.И. Вавилова. Естественные, технические, экономические науки*, 2013. № 07. С. 11–15.
- [32] Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П. Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.). Морфометрия и физиология хвои плюсовых деревьев. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии, 2014. 368 с.
- [33] Бессчетнов В.П., Бессчетнова Н.Н., Клишина Л.И., Храмова О.Ю., Бычкова Т.Н., Горелова З.В., Соколова А.А., Кентбаев Е.Ж., Кентбаева Б.А., Шабалина М.В. Пигментный состав хвои семян сосны обыкновенной с открытой и закрытой корневой системой // *Вестник Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии*, 2014. Т. 4. С. 36–51.
- [34] Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П. Индекс генотипического несходства плюсовых деревьев как критерий их совместимости на лесосеменных плантациях // *Актуальные проблемы лесного комплекса / под ред. Е.А. Памфилова*. Брянск: БГИТУ, 2016. Вып. 44. С. 13–16.
- [35] Самойлова Л.И., Бессчетнов В.П. Содержание пигментов в хвое сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), выращенной по различным технологиям в Республике Татарстан // *Экономические аспекты развития АПК и лесного хозяйства. Лесное хозяйство Союзного государства России и Белоруссии. Материалы междунар. науч.-практ. конф.: Нижний Новгород, 26 сентября 2019 г. / под ред. Н.Н. Бессчетновой*. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии, 2019. С. 212–219.
- [36] Третьяков Н.Н., Карнаухова Т.В., Паничкин Л.А. Практикум по физиологии растений. М.: Агропромиздат, 1990. 271 с.
- [37] Хэлворсон М. Эффективная работа с Microsoft Office 2006. СПб.: Питер, 2000. 1234 с.

Сведения об авторах

Бабаев Рамис Натигович — зам. генерального директора Союза лесовладельцев Нижегородской области, lp-ram17@yandex.ru

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

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

Поступила в редакцию 08.11.2021.

Одобрено после рецензирования 17.12.2021.

Принята к публикации 04.04.2022.

GENUS BIRCH (*BETULA* L.) LEAF PLATES PIGMENTATION

R.N. Babaev^{1,2}, N.N. Besschetnova¹, V.P. Besschetnov¹✉

¹Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, 97, Gagarin av., 603107, Nizhny Novgorod, Russia

²Union of Forest Owners of the Nizhny Novgorod region, 9, Nesterov st., 603005, Nizhny Novgorod, Russia

lesfak@bk.ru

A comparative assessment of various species included in the taxonomic system of the genus birch (*Betula* L.) by the content of pigments in the leaf apparatus was carried out. The content of pigments involved in photosynthesis was determined by spectrophotometric analysis. The concentration of pigments was estimated by the optical density of the extract from the crushed sheet plate in 96 % ethanol. It is established that the pigment composition of the leaf apparatus of various types and forms of birch is determined by genotypic and phenotypic features. The studied samples within the species showed a more restrained character in terms of the difference in pigment composition in relation to the interspecific ratio in June. However, when taking into account the same studied signs in July and August, their restraint was also observed between species and forms. The hereditary and adaptive nature of the content of photosynthetic pigments of the leaf apparatus allows us to consider this indicator as one of the identification features during the selection inventory and revision of the assortment composition of breeding and seed-growing objects. Taking into account the success of the growth of European birch on the territory of the Nizhny Novgorod region, it follows that Karelian birch is suitable for introduction into the newly created plantings, as experiments emphasize its pronounced similarity with the native species.

Keywords: birch, leaf apparatus, pigment composition, chlorophyll, carotenoids

Suggested citation: Babaev R.N., Besschetnova N.N., Besschetnov V.P. *Pigmentatsiya listovykh plastin predstaviteley roda bereza (Betula L.)* [Genus birch (*Betula* L.) leaf plates pigmentation]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 3, pp. 29–38. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-29-38

References

- [1] Zakharov A.B., Besschetnov V.P. *Anomalii vetvleniya berezy (Betula) v zashchitnykh lesnykh polosakh avtomagistraley* [Anomalies of birch branching (*Betula*) in protective forest lanes of highways]. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*, 2019, no. 5, pp. 95–104. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.95
- [2] Babaev R.N. *Soderzhanie krakhmala v tkanyakh pobegov raznykh vidov berezy v usloviyakh introduksii* [Starch content in the tissues of shoots of different types of birch in the conditions of introduction]. *Rost i vosproizvodstvo nauchnykh kadrov v APK: Sbornik trudov po itogam Rossiyskoy natsional'noy nauchno-prakticheskoy internet-konferentsii dlya obuchayushchikhsya i molodykh uchenykh*, Nizhny Novgorod, 19–20 dekabrya 2019 goda [Growth and reproduction of scientific personnel in the agro-industrial complex: A collection of papers on the results of the Russian National Scientific and practical Internet conference for students and young scientists, Nizhny Novgorod, December 19–20, 2019]. Ed. N.N. Besschetnova. Nizhny Novgorod: Nizhegorodskaya GSKhA [Nizhny Novgorod State Agricultural Academy], 2020, pp. 74–78.
- [3] Babaev R.N. *Sravnitel'naya morfologiya listovykh plastin berezy karel'skoy i berezy povisloy na territorii Nizhegorodskoy oblasti* [Comparative morphology of leaf plates of Karelian birch and hanging birch on the territory of the Nizhny Novgorod region]. *Sovremennoe lesnoe khozyaystvo — problemy i perspektivy: mater. Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 50-letiyu «VNIILGISbiotech»* [Modern forestry — problems and prospects. Materials of the All-Russian Scientific and practical conference dedicated to the 50th anniversary of VNIILGISBiotech], Voronezh, December 3–4, 2020. Voronezh: VNIILGISbiotech, 2020, pp. 22–25.
- [4] Babaev R.N., Besschetnova N.N., Besschetnov V.P. *Lignifikatsiya ksilemy raznykh vidov berezy pri introduksii v usloviyakh Nizhegorodskoy oblasti* [Lignification of xylem of different birch species during introduction in the conditions of the Nizhny Novgorod region]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Bulletin of Saint-Petersburg forestry Academy], 2021, no. 235, pp. 40–56. DOI 10.21266/2079-4304.2021.235.40–56
- [5] Zhao Xi-yang, Bian Xiu-yan, Li Zhi-xin, Wang Xiewei, Chehg-jun Yang, Liu Gui-feng, Jiang Jing, Kentbayev Y., Kentbayeva B., Yang Chuan-ping Genetic stability analysis of introduced *Betula pendula*, *B. kirghisorum*, and *Betula pubescens* families in saline-alkali soil of northeastern China. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2014, no. 4, 26 p.
- [6] Kundzin'sh A.V., Igaunis G.A., Gaylis Ya.Ya., Pirags D.M., Rone V.M., Ronis E.Ya., Sarma V.P., Smilga Ya.Ya. *Lesnaya selektsiya* [Forest tree breeding]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forestry industry], 1972, 200 p.
- [7] Ozolina I.A., Mochalkin A.I. *Rol' pigmentov v zashchitno-prisposobitel'nykh reaktivnykh rasteniy* [The role of pigments in protective and adaptive reactions of plants]. *Izvestiya AN SSSR. Series Biology*, 1972, no. 1, pp. 96–102.
- [8] Khodasevich E.V. *Fotosinteticheskiy apparat khvoynykh* [Photosynthetic apparatus of conifers]. Minsk: Nauka i tehnika [Science and technology], 1982, 199 p.
- [9] Voronin P.Yu., Efimtsev E.I., Vasil'ev A.A., Vatkovskiy O.S., Mokronosov A.T. *Proektivnoe sodержanie khlorofilla i bioraznoobrazie rastitel'nosti osnovnykh botaniko-geograficheskikh zon Rossii* [Projective chlorophyll content and biodiversity of vegetation main phytogeographical zones of Russia]. *Fiziologiya rasteniy* [Plant physiology], 1995, t. 42, no. 2, pp. 295–302.
- [10] Tuzhilkina V.V., Bobkova K.S., Martynyuk Z.P. *Khlороfill'nyy indeks i ezhгодnyy fotosinteticheskiy stok ugleroda v khvoynye fitotsenozy na evropeyskom severe Rossii* [Chlorophyll index and annual photosynthetic carbon sinks in the coniferous plant communities in the European North of Russia]. *Fiziologiya rasteniy* [Plant physiology], 1998, t. 45, no. 4, pp. 594–600.
- [11] Tuzhilkina V.V. *Proektivnoe sodержanie khlorofilla v korennykh elovykh fitotsenozakh* [Projective chlorophyll content in indigenous communities of spruce]. *Vestnik Instituta biologii Komi NC UrO RAN* [Bulletin of the Institute of biology, Komi scientific center, Ural branch, Russian Academy of Sciences], 2009, no. 4, pp. 30–32.

- [12] Fomin V.V., Shavin S.A., Marina N.V., Novoselova G.N. *Nespetsificheskaya reaktsiya fotosinteticheskogo apparata khvoi sosny na deystvie aeropromyshlennykh zagryazneniy i zatneniya* [Nonspecific reaction of the photosynthetic apparatus of pine needles to the effect of airborne pollution and shading]. *Fiziologiya rasteniy* [Plant physiology], 2001, t. 48, no. 5, pp. 760–765.
- [13] Mosse I.B., Molofey V.P., Kostrova L.N. *Razvitie idei N.I. Vavilova o zashchitnoy roli pigmentov v geneticheskikh eksperimentakh* [The development of the idea of N.I. Vavilov on the protective role of pigments in genetic experiments]. *Selektsiya, geneticheskie resursy i sokhranenie genofonda lesnykh drevesnykh rasteniy (Vavilovskie chteniya): sb. nauchnykh trudov Instituta lesa NAN Belarusi* [Breeding, genetic resources and gene pool conservation of forest trees (Vasilevskii read): collection of articles. scientific works of the Institute of Forest of the National Academy of Sciences of Belarus], 2003, v. 59, pp. 220–223.
- [14] Peguero-Pina J.J., Morales F., Gil-Pelegrín E. Frost Damage in *Pinus sylvestris* L. Stems Assessed by Chlorophyll Fluorescence in Cortical Bark Chlorenchyma. *Annals of Forest Science*, 2008, v. 65(8), pp. 813p1–813p6. DOI: 10.1051/forest:2008068
- [15] Niinemets Ü. Acclimation to Low Irradiance in *Picea abies*: Influences of Past and Present Light Climate on Foliage Structure and Function. *Tree Physiology*, 1997, v. 17, iss. 11, pp. 723–732. DOI: 10.1093/treephys/17.11.723
- [16] Niinemets Ü. Stomatal Conductance Alone Does not Explain the Decline in Foliar Photosynthetic Rates with Increasing Tree Age and Size in *Picea abies* and *Pinus sylvestris*. *Tree Physiology*, 2002, v. 22, iss. 8, pp. 515–535. DOI: 10.1093/treephys/22.8.515
- [17] Bouvier F., Backhaus R.A., Camara B. Induction and Control of Chloroplast Specific Carotenoid Genes by Oxidative Stress. *J. of Biological Chemistry*, 1998, v. 273, no. 46, pp. 30651–30659. DOI: 10.1074/jbc.273.46.30651
- [18] Skuodienė L. Quantitative Changes in Aminoacid Proline and Chlorophyll in the Needles of *Picea abies* Karst. (L.) during Stress and Adaptation. *Biologija*, 2001, no. 2, pp. 54–56.
- [19] Porcar-Castell A., Juurola E., Ensminger I., Berninger F., Hari P., Nikinmaa E. Seasonal Acclimation of Photosystem II in *Pinus sylvestris*. II. Using the Rate Constants of Sustained Thermal Energy Dissipation and Photochemistry to Study the Effect of the Light Environment. *Tree Physiology*, 2008, v. 28, iss. 10, pp. 1483–1491. DOI: 10.1093/treephys/28.10.1483
- [20] Porcar-Castell A., Juurola E., Ensminger I., Berninger F., Hari P., Nikinmaa E. Seasonal Acclimation of Photosystem II in *Pinus sylvestris*. I. Estimating the Rate Constants of Sustained Thermal Energy Dissipation and Photochemistry. *Tree Physiology*, 2008, v. 28, iss. 10, pp. 1475–1482. DOI: 10.1093/treephys/28.10.1475
- [21] Lichtenthaler H.K. Chlorophyll a and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology: Plant Cell Membranes*, 1987, v. 148, pp. 350–382.
- [22] Lichtenthaler, H.K. Chlorophylls and Carotenoids: Measurement and Characterization by UV-VIS Spectroscopy. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*, 2001, unit F4.3, pp. F4.3.1–F4.3.
- [23] Lichtenthaler H.K. Biosynthesis and Accumulation of Isoprenoid Carotenoids and Chlorophylls and Emission of Isoprene by Leaf Chloroplasts. *Bulletin of the Georgian National Academy of sciences*, 2009, v. 3, no. 3, pp. 81–94.
- [24] Porra R.G., Thomson W.A., Kriedemann P.E. Determination of accurate extinction coefficients and simultaneous equations for assaying chlorophylls a and b extracted with four different solvents: verification of the concentration of chlorophyll standards by atomic absorption spectroscopy. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1989, v. 975, pp. 384–394.
- [25] Wellburn A.R. The Spectral Determination of Chlorophylls a and b, as well as Total Carotenoids, Using Various Solvents with Spectrophotometers of Different Resolution. *J. of plant physiology*, 1994, v. 144, iss. 3, pp. 307–313.
- [26] Rosenthal S.I., Camm E.L. Photosynthetic decline and pigment loss during autumn foliar senescence in western larch (*Larix occidentalis*). *Tree Physiology*. Victoria, Canada: Heron Publishing, 1997, v. 17 (12), pp. 767–775.
- [27] Besschetnova N.N. *Soderzhanie osnovnykh pigmentov v khvoe plyusovykh derev'ev sosny obyknovennoy* [The content of the main pigments in the conifers of the plus trees of the common pine]. *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*, 2010, no. 6 (75), pp. 4–10.
- [28] Besschetnova N.N. *Pigmentnyy sostav khvoi plyusovykh derev'ev sosny obyknovennoy v arkhivakh klonov* [The pigment composition of the needles of plus-sized pine trees in the archives of clones]. *Trudy fakul'teta lesnogo khozyaystva Nizhegorodskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* [Proceedings of the Faculty of Forestry of the Nizhny Novgorod State Agricultural Academy: Collection of scientific articles]. Nizhny Novgorod: Nizhegorodskaya GSKhA [Nizhny Novgorod State Agricultural Academy], 2011, no. 1 (1), pp. 56–65.
- [29] Miazek K., Ledakowicz S. Chlorophyll extraction from leaves, needles and microalgae: A kinetic approach. *International J. of Agricultural and Biological Engineering*, 2013, v. 6, no. 2, pp. 107–115.
- [30] Besschetnova N.N. *Mnogomernaya otsenka plyusovykh derev'ev sosny obyknovennoy (Pinus sylvestris L.) po pokazatelyam pigmentnogo sostava khvoi* [Multivariate assessment of the positive trees of scots pine (*Pinus sylvestris* L.) by indicators of the pigment composition of needles]. *Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* [Bulletin of the Mari State Technical University. Series: Forest. Ecology. Nature management], 2013, no. 1 (17), pp. 5–14.
- [31] Besschetnova N.N. *Indeks neidentichnosti v selektsionnoy otsenke plyusovykh derev'ev* [Index of non-identity in the selection evaluation of plus trees]. *Vestnik Saratovskogo gosagrouniversiteta im. N.I. Vavilova. Estestvennye, tekhnicheskie, ekonomicheskie nauki* [Bulletin of Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov. Natural, technical, economic sciences], 2013, no. 07, pp. 11–15.
- [32] Besschetnova N.N., Besschetnov V.P. *Sosna obyknovennaya (Pinus sylvestris L.). Morfometriya i fiziologiya khvoi plyusovykh derev'ev* [Common pine (*Pinus sylvestris* L.). Morphometry and physiology of the needles of plus trees]. Nizhny Novgorod: Nizhegorodskaya GSKhA [Nizhny Novgorod State Agricultural Academy], 2014, 368 p.
- [33] Besschetnov V.P., Besschetnova N.N., Klishina L.I., Khramova O.Yu., Bychenkova T.N., Gorelova Z.V., Sokolova A.A., Kentbaev E.Zh., Kentbaeva B.A., Shabalina M.V. *Pigmentnyy sostav khvoi seyantsev sosny obyknovennoy s otkrytoy i zakrytoy kornevoy sistemoy* [Pigment composition of needles of seedlings of scots pine with open and closed root system]. *Vestnik Nizhegorodskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* [Bulletin of the Nizhny Novgorod State Agricultural Academy], 2014, t. 4, pp. 36–51.

- [34] Besschetnova N.N., Besschetnov V.P. *Indeks genotipicheskogo neskhodstva plusovykh derev'ev kak kriteriy ikh sovmestimosti na lesosemennykh plantatsiyakh* [Index of genotypic dissimilarity of plus trees as a criterion of their compatibility on forest seed plantations]. Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa [Actual problems of the forest complex]. Ed. E.A. Pamfilov. Bryansk: BGITU, 2016, v. 44, pp. 13–16.
- [35] Samoylova L.I., Besschetnov V.P. *Soderzhanie pigmentov v khvoe sosny obyknovennoy (Pinus sylvestris L.), vyrashchennoy po razlichnym tekhnologiyam v Respublike Tatarstan* [The content of pigments in the coniferous pine (*Pinus sylvestris* L.) grown by various technologies in the Republic of Tatarstan]. Ekonomicheskie aspekty razvitiya APK i lesnogo khozyaystva. Lesnoe khozyaystvo Soyuznogo gosudarstva Rossii i Belorussii. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Economic aspects of the development of agriculture and forestry. Forestry of the Union State of Russia and Belarus. Materials of the International scientific and practical conference]. Nizhny Novgorod, September 26, 2019. Ed. N.N. Besschetnova. Nizhny Novgorod: Nizhegorodskaya GSKhA [Nizhny Novgorod State Agricultural Academy], 2019, pp. 212–219.
- [36] Tret'yakov N.N., Karnaukhova T.V., Panichkin L.A. *Praktikum po fiziologii rasteniy* [Practicum on plant physiology]. Ed. N.N. Tret'yakov. Moscow: Agropromizdat, 1990, 271 p.
- [37] Khelvorson M. *Effektivnaya rabota s Microsoft Office 2006* [Effective work with Microsoft Office 2006]. St. Petersburg: Peter, 2000, 1234 p.

Author's information

Babaev Ramis Natigovich — Deputy Director General of the Union of Forest Owners of the Nizhny Novgorod Region, lp-ram17@yandex.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 Vladimir Petrovich✉ — Dr. Sci. (Biology), Professor, Head of the Department of Forest crops of the Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, lesfak@mail.ru

Received 08.11.2021.

Approved after review 17.12.2021.

Accepted for publication 04.04.2022.

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

ВЛИЯНИЕ НИЗКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА АНАТОМИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ СТЕБЛЯ ОДНОЛЕТНИХ СЕЯНЦЕВ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ (*PINUS SYLVESTRIS* L.) И ДУБА КРАСНОГО (*QUERCUS RUBRA* L.)

А.И. Смирнов¹, П.А. Аксенов²✉

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

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

axenov.pa@mail.ru

Приведены результаты исследований по определению эффективности влияния низкочастотного электромагнитного поля на анатомическое строение стебля однолетних сеянцев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) с закрытой корневой системой, проведенных в питомнике Устьянского лесосеменного селекционного центра Архангельской обл., и однолетних сеянцев дуба красного (*Quercus rubra* L.), проведенных в лесном питомнике Донского лесхоза Управления лесного хозяйства Липецкой обл., при посадке в открытый грунт с внесением гидрогеля. Проведена обработка опытных образцов однолетних сеянцев сосны обыкновенной и дуба красного низкочастотным электромагнитным полем по запатентованной технологии ПОСЭП (предпосевная обработка семян и сеянцев электромагнитным полем) прибором «Рост-Актив» (низкочастотным генератором). Контролем служили необработанные сеянцы. Проведенные в лаборатории кафедры лесных культур, селекции и дендрологии МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал) гистометрические анализы опытных и контрольных образцов однолетних сеянцев сосны обыкновенной и дуба красного показали положительное влияние низкочастотного электромагнитного поля на анатомические характеристики их стеблей. **Ключевые слова:** низкочастотное электромагнитное поле (НЧ ЭМП), технология ПОСЭП, гистометрия, анатомическое строение, гидрогель

Ссылка для цитирования: Смирнов А.И., Аксенов П.А. Влияние низкочастотного электромагнитного поля на анатомическое строение стебля однолетних сеянцев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и дуба красного (*Quercus rubra* L.) // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 3. С. 39–46. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-39-46

В настоящее время внимание исследователей привлекают физические факторы воздействия на рост растений, в частности электромагнитные поля искусственного происхождения. Известно, что электромагнитное поле (ЭМП) является одним из важных экологических факторов, влияющих на биологическую активность растений [1]. Анализ литературных источников и проведение собственных исследований доказывают, что обработка семян ЭМП повышает их всхожесть, положительно влияет на рост и развитие растений [2–4]. Для решения этих задач была создана и успешно опробована инновационная технология выращивания лесокультурного материала (технология ПОСЭП) и создан прибор «Рост-Актив» на основе генератора низкочастотного (НЧ) ЭМП [5, 6].

Получение экспериментальных данных и сравнение важнейших биометрических характеристик (высоты и массы сеянцев, массы стволика, хвои и корней), гистометрических характеристик древесины, стеблей однолетних сеянцев выявило существенное превышение значений показателей опытных образцов относительно контрольных [7, 8]. Это указывает на ускорение ростовых процессов

сеянцев, обработанных НЧ ЭМП, что в свою очередь способствует получению стандартного посадочного материала в более сжатые сроки.

В течение нескольких лет нами проводятся исследования влияния обработки НЧ ЭМП семян древесных пород на их посевные качества, а также на рост и развитие сеянцев.

В лаборатории кафедры «Лесные культуры, селекция и дендрология» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал) был проведен гистометрический анализ древесины стволиков однолетних сеянцев сосны обыкновенной и дуба красного, который показал положительный результат влияния обработки НЧ ЭМП на анатомические показатели ксилемы опытных сеянцев.

Цель работы

Цель работы — изучение влияния НЧ ЭМП на анатомическое строение стволиков однолетних сеянцев сосны обыкновенной и дуба красного.

Объекты и методы исследования

Исследования с однолетними сеянцами сосны обыкновенной проводились в питомнике Устьянского лесосеменного селекционного центра (УЛССЦ) Архангельской обл. В июне 2017 г. были

обработаны опытные образцы сеянцев сосны с закрытой корневой системы по технологии ПОСЭП с помощью НЧ генератора «Рост-Актив» с частотой 16 Гц при возрастающем значении индукции магнитного поля от 0,4 до 2,0 мТл, время экспозиции 11 мин [9] (рис. 1).



Рис. 1. Обработка однолетних сеянцев сосны обыкновенной прибором «Рост-Актив»

Fig. 1. Processing of annual seedlings of Scots pine with the «Rost-Active» device



Рис. 2. Контроль (а), опыт 1 (обработка ЭМП) (б), опыт 2 (обработка ЭМП + гидрогель) (в)

Fig. 2. Control (a), experiment 1 (EMF treatment) (б), experiment 2 (EMF treatment + hydrogel) (в)

Экспериментальные опыты с однолетними сеянцами дуба красного с открытой корневой системой проводились в питомнике Донского лесничества Управления лесного хозяйства

Липецкой обл. В апреле 2019 г. были заложены контрольные и опытные посадки сеянцев на участке 150 пог. м. посадочной гряды.

Для сравнения были отобраны по 50 сеянцев в трех вариантах:

- 1) контроль — сеянцы необработанные;
- 2) опыт 1 — сеянцы, обработанные ЭМП;
- 3) опыт 2 — сеянцы, обработанные ЭМП + гидрогель (50 шт.).

Перед посадкой в лунки сеянцы для опытов 1 и 2 обрабатывали по технологии ПОСЭП НЧ генератором «Рост-Актив» (частота 16 Гц с возрастающим значением индукции магнитного поля от 0,4 до 2,0 мТл и экспозицией 11 мин). Сеянцы высаживали под меч Колесова с шагом посадки 1 м. В опыте 2 предварительно в посадочные лунки вносили гидрогель [10], набухший в воде (из расчета 2 г сухого гидрогеля на 1 лунку), а затем высаживали сеянцы, обработанные ЭМП.

В сентябре 2019 г. был сделан учет прижившихся сеянцев на опытных и контрольном участках и проведены биометрические обмеры сеянцев дуба красного (рис. 2).

Далее проводился отбор контрольных и опытных сеянцев для детальных исследований в лаборатории кафедры «Лесные культуры, селекция и дендрология» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал) [11–17].

Для проведения гистометрического анализа поперечных срезов использована следующая методика. Из сеянцев вырезали 1–2-сантиметровые участки стволиков с корневой шейкой, которые подвергали воздействию размягчающей спиртоглицериновой смеси (соотношение компонентов 1:1) в течение 10 сут при температуре 25...30 °С. Затем получали поперечные срезы с помощью микротомы МС-2 и окрашивали в соответствии с общепринятой методикой [18]. Временные глицериновые препараты изготавливали в соответствии с методикой [19], микроскопирование проводили в прямом светопольном и поляризационном режимах на исследовательском биологическом микроскопе Jenoval (производство фирмы «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 древесины фотографировали с помощью микрофотонасадки.

Для проверки достоверности полученных результатов руководствовались общепринятыми методиками статистической обработки [20] и программой Microsoft Excel.

Сравнительный гистометрический анализ поперечных срезов контрольных и опытных стволиков сеянцев дуба показал следующие результаты (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Средние гистометрические характеристики семян дуба, обработанных ЭМП и гидрогелем (объемы сравниваемых выборок — по 10 семян; $\alpha = 0,05$)Average histometric characteristics of oak seedlings treated with EMF and hydrogel (volumes of compared samples - 10 seedlings each; $\alpha = 0,05$)

№	Варианты опытов и статистические показатели различий выборок	Диаметр сердцевины, мм	Ширина кольца ксилемы, мм	Диаметр сосудов вторичной древесины, мкм
1	Контроль	1,51 ± 0,087	0,86 ± 0,034	18,7 ± 0,910
	% к контролю	100	100	100
2	Опыт 1 (обработка ЭМП)	1,79 ± 0,122	1,43 ± 0,074	19,6 ± 0,990
	% к контролю	118	166	105
	$t_{расч}/t_{ст}$	1,87/2,1	6,99/2,1	0,67/2,1
3	Опыт 2 (обработка ЭМП + гидрогель)	1,55 ± 0,065	1,31 ± 0,069	21,7 ± 1,080
	% к контролю	103	152	116
	$t_{расч}/t_{ст}$	0,37/2,1	5,85/2,1	2,12/2,1

Примечание. Приведены средние арифметические значения анатомических характеристик ± ошибка средней арифметической; $t_{ст}$ — стандартное значение t -критерия достоверности различий 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.

Как видно из табл. 1, размер сердцевины сравниваемых групп в опытных вариантах превышает контроль; ширина кольца суммарной ксилемы в опытах 1 и 2 значительно больше контроля; радиальный прирост древесины на уровне корневой шейки имеет максимальное значение в опыте 1 (обработка ЭМП).

Сравнение средних диаметров сосудов вторичной ксилемы в различных вариантах эксперимента выявило тенденцию увеличения среднего диаметра членка сосуда в ряду контроль — опыт 1 — опыт 2.

При анатомическом исследовании поперечных срезов установлены следующие особенности строения стебля на уровне корневой шейки:

- в целом вторичная ксилема во всех вариантах эксперимента имеет общие ювенильные черты; особенно стоит отметить высокую степень паренхиматизации последнего радиального прироста семян, представленную как множественными однорядными сердцевинными лучами, так и высоким содержанием метатрахеальной крахмалоносной паренхимы (рис. 3);

- сердцевина всех вариантов содержит достаточно много мелких крахмальных зерен; наблюдается тенденция увеличения встречаемости крахмала в клетках сердцевины в опытных вариантах по сравнению с контролем (рис. 4);

- ширина слоя вторичной ксилемы значительно больше в вариантах с обработкой ЭМП; отмечается большая упорядоченность радиальных цепочек просветов сосудов при увеличении годового кольца (рис. 5);

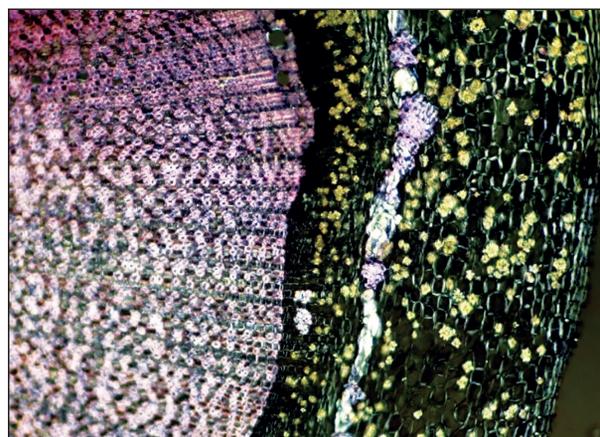


Рис. 3. Поперечный срез семца дуба (опыт 2) в режиме скрещенных николей (объектив GF-Plan 12,5/0,25/∞/—; зона сильно паренхиматизированной древесины справа; в кольце коры есть множественные кристаллы оксалата и сплошное светлое волокно-склерейдное кольцо)

Fig. 3. Transverse section of an oak seedling (experiment 2) in the crossed nicols mode (lens GF-Plan 12.5/0.25/∞/—; zone of strongly parenchymatized wood on the right; in the bark ring there are multiple oxalate crystals and a continuous light fiber-sclereid ring)

- ширина коры также имеет большие значения у растений, подвергнутых действию ЭМП, однако при этом сохраняется целостность внутреннего кольца коры, образованного чередующимися участками волокон первичного луба и скоплениями каменистых клеток; основную массу первичной коры составляет тонкостенная паренхима, содержащая большое количество мелких друз и одиночных кристаллов оксалата кальция, выявляемых в режиме поляризации (см. рис. 3);

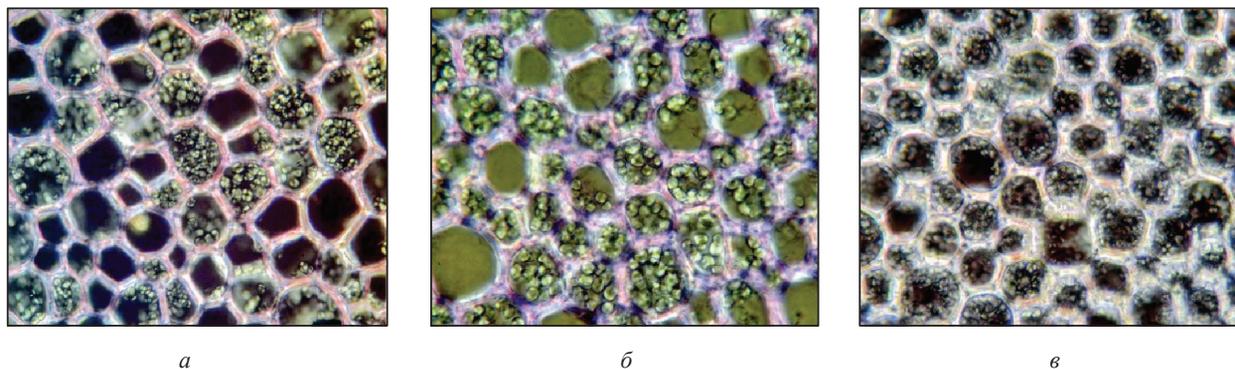


Рис. 4. Поперечные срезы сердцевины семян дуба в режиме частично скрещенных николей (объектив GF-Plan 40/0,65/∞/0,17): *a* — контроль; *б* — опыт 1; *в* — опыт 2

Fig. 4. Cross sections of the core of oak seedlings in the mode of partially crossed nicols (objective GF-Plan 40/0.65/∞/0.17): *a* — control; *б* — experiment 1; *в* — experiment 2

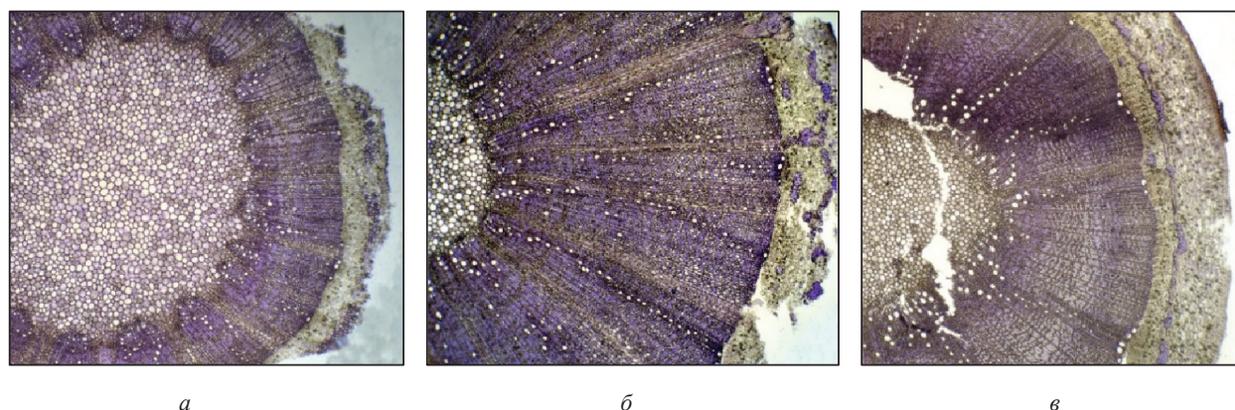


Рис. 5. Поперечные срезы стволиков семян дуба при одном увеличении (объектив GF-Plan 3,2/0,06/∞/–, окраска генцианвиолетом): *a* — контроль; *б* — опыт 1; *в* — опыт 2

Fig. 5. Transverse sections of stems of oak seedlings at one magnification (GF-Plan 3.2/0.06/∞/– lens, stained with gentian violet): *a* — control; *б* — experiment 1; *в* — experiment 2

агрегатные лучи, как правило, заканчиваются в коре с образованием крупных зон склерификации и кальцинации.

В целях изучения воздействия НЧ ЭМП на макро- и микроанатомические характеристики древесины однолетнего посадочного материала сосны обыкновенной исследованы гистометрические характеристики поперечных срезов древесины стеблей (стволиков). Сравнительно-анатомическое исследование двух вариантов (1 — обработка НЧ ЭМП; 2 — контроль) выявило следующие особенности строения ксилемы однолетних сеянцев:

- ширина годичного кольца ксилемы при обработке ЭМП увеличилась на 15...25 % по сравнению с контролем;

- в варианте 1 граница годичного кольца ксилемы выражена четче и почти не имеет разрывов;

- общая выраженность, толщина и встречаемость сердцевидных лучей на анализируемых срезах заметно выше у варианта 1;

- выраженность радиальной упорядоченности поперечных сечений трахеид на торцевых срезах одинакова в обоих вариантах опыта;

- среднее число клеток в радиальном ряду: для варианта 1 — (47 ± 10) шт./ряд, для варианта 2 — (36 ± 12) шт./ряд;

- толщина клеточных стенок трахеид годичного кольца ксилемы при обработке ЭМП заметно больше, чем в контроле;

- участки первичной ксилемы выражены значительно лучше у варианта 1;

- вертикальные смоляные ходы встречаются на 20...30 % чаще у варианта 1.

На рис. 6 видны участки поперечных срезов стволиков однолетних сеянцев.

Дополнительно проведено сравнение влажности и зольности опытных и контрольных сеянцев.

Влажность сеянцев определяли гравиметрическим методом путем вычисления (в процентах) потери массы после высушивания в сушильном шкафу при 103 °С (до постоянной массы) в соответствии с ГОСТ 16483.7–71 [21]. Зольность сеянцев определяли как массовую долю сухого остатка после озольнения высушенной биомассы сеянцев в муфельной печи в соответствии с ГОСТ Р 56881–2016 [22].

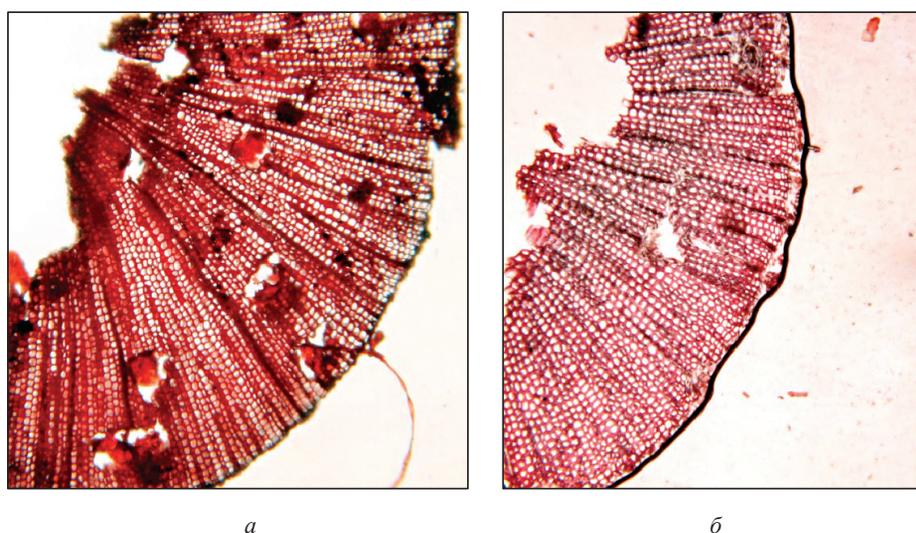


Рис. 6. Участки поперечных микросрезов стволиков однолетних сеянцев (объектив: GF-Plan 12,5/0,25/160/0,17): *a* — опыт; *б* — контроль
Fig. 6. Areas of transverse microsections of stems of annual seedlings (objective: GF-Plan 12.5/0.25/160/0.17): *a* — experiment; *б* — control

Результаты сравнений показателей влажности и зольности сеянцев «опыта» и «контроля» представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Влажность и зольность однолетних сеянцев сосны обыкновенной (объемы сравниваемых выборок — по 10 сеянцев; $\alpha = 0,05$)

Humidity and ash content in annual seedlings of Scots pine (volumes of compared samples — 10 seedlings each; $\alpha = 0,05$)

№	Варианты опытов и статистические показатели различий выборок	Влажность, %	Зольность, %
1	Контроль	43,47 ± 2,4	3,61 ± 0,14
2	Опыт (обработка ЭМП)	58,87 ± 2,6	4,10 ± 0,16
% к контролю		136	114
$t_{расч}/t_{ст}$		4,4/2,1	2,2/2,1
<p><i>Примечание.</i> Приведены средние арифметические значения физиологических характеристик ± ошибка средней арифметической; $t_{ст}$ — стандартное значение t-критерия достоверности различий 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.</p>			

Представленные в табл. 2 данные свидетельствуют о том, что обработанные ЭМП сеянцы имеют большую влажность и содержат большую концентрацию зольных элементов. Это указывает на более высокие показатели метаболической, прежде всего ассимиляционной, активности обработанных сеянцев.

Различия средних показателей вариантов сравнений достоверны на уровне значимости 5 %.

Таким образом, обработка НЧ ЭМП привела к ускоренному формированию вторичной ксилемы основного стебля однолетних сеянцев сосны обыкновенной, при этом формирующиеся анатомические элементы древесины имеют большую толщину клеточных стенок по сравнению с контролем. Можно предположить, что выявленные изменения гистометрических характеристик опытных растений будут способствовать повышению приживаемости сеянцев, а также более интенсивному начальному росту культур, заложенных с использованием посадочного материала, обработанного НЧ ЭМП.

Выводы

Сравнение ряда важнейших гистометрических характеристик стеблей, влажности и зольности однолетних сеянцев выявило существенное превышение значений показателей опытных образцов по сравнению с контролем. Это указывает на ускорение ростовых процессов сеянцев, обработанных НЧ ЭМП, что способствует получению стандартного посадочного материала в более сжатые сроки. Использование НЧ ЭМП как способа повышения качества посадочного материала является принципиально новым и перспективным направлением, способным решать задачи развития лесного хозяйства России.

Список литературы

[1] Пресман А.С. Электромагнитное поле и жизнь. М.: Наука, 2003. 215 с.

- [2] Барышев М.Г., Джимаков С.С. Исследование влияния низкочастотного электромагнитного поля на биологические объекты. Краснодар: Кубанский госуд. ун-т, 2012. С. 1–15.
- [3] Старухин Р.С., Белицин И.В., Хомутов О.И. Метод предпосевной обработки семян с использованием эллиптического электромагнитного поля // Ползуновский вестник, 2009. № 4. С. 97–103.
- [4] Фирсов В.Ф., Чекмарев В.В., Левин В.А. Использование физических факторов и микроэлементов в повышении болезнестойчивости и продуктивности возделываемых культур // Вопросы современной науки и практики, 2005. № 1. С. 19–26.
- [5] 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.
- [6] Смирнов А.И., Орлов Ф.С. Устройство для предпосевной обработки посевного материала. Пат. № 155132 РФ, заявитель и патентообладатель ООО «Разносервис», 2014. Бюл. № 26.
- [7] Смирнов А.И., Орлов Ф.С., Беляев В.В., Аксенов П.А. Влияние низкочастотного электромагнитного поля на биометрические характеристики семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) // ИВУЗ Лесной журнал, 2019. № 2 С. 78–84.
- [8] Смирнов А.И., Орлов Ф.С., Аксенов П.А., Яськов Ю.В. Эффективность влияния низкочастотного электромагнитного поля и гидрогеля на приживаемость и рост однолетних семян дуба красного (*Quercus rubra* L.) // ИВУЗ Лесной журнал, 2020. № 5. С. 81–89.
- [9] De Lucas M., Etchells J.P. (Eds.) Xylem — Methods and Protocols. New York: Publishing Humana Press, 2017, p. 260.
- [10] Schweingruber F.H. Wood Structure and Environment (Springer Series in Wood Science). Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2007, p 280.
- [11] 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.
- [12] Sarvaš M, Pavlenda P., Takáčová E. Effect of hydrogel application on survival and growth of pine seedlings in reclamation // J. of forest science, 2007, v. 53 (5), pp. 204–209.
- [13] Willan R.L. A Guide to Forest Seed Handling with Special Reference to the Tropics. FAO, Rome: Forestry Paper, 1987, no. 20/2.
- [14] Mudhanganyi A., Maravanyika C., Ndagurwa H.G.T., Mwase R. The Influence of Hydrogel Soil Amendment on the Survival and Growth of Newly Transplanted *Pinus patula* Seedlings // J. of Forestry Research, 2018, v. 29, iss. 1, pp. 103–109. DOI: 10.1007/s11676-017-0428-1.
- [15] Fischer G., Tausz M., Köck M., Grill D. Effect of Weak 16½ Hz Magnetic Fields on Growth Parameters of Young Sunflower and Wheat Seedlings // Bioelectromagnetics, 2004, v. 25, iss. 8, pp. 638–641. DOI: 10.1002/bem.20058/
- [16] Penuelas J., Llusia J., Martinez B., Fontcuberta J. Diamagnetic Susceptibility and Root Growth Responses to Magnetic Fields in *Lens culinaris*, *Glycine soja*, and *Triticum aestivum* // Electromagnetic Biologu and Medicine, 2004, v. 23, no. 2, pp. 97–112.
- [17] Gordon G.A. Seed manual for forest trees. UK, London: Forestry Commission, 1992, 132 p.
- [18] Смирнов А.И. Влияние низкочастотного электромагнитного поля на всхожесть семян и рост семян сосны обыкновенной в питомниках зоны смешанных лесов: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М.: МГУЛ, 2016. С. 17.
- [19] Данилова Т.Н., Козырева Л.В. Возможности использования гидрогелей для управления водообеспеченностью полей // Плодородие, 2008. № 6. С. 24–25.
- [20] Свалов Н.Н. Вариационная статистика. М.: МГУЛ, 2001. С. 80.
- [21] ГОСТ 16483.7–71 Древесина. Методы определения влажности, 1999. 4 с.
- [22] ГОСТ Р 56881–2016 Биомасса. Определение зольности стандартным методом, 2016. 8 с.

Сведения об авторах

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

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

Поступила в редакцию 14.02.2022.

Одобрено после рецензирования 03.03.2022.

Принята к публикации 13.05.2022.

LOW-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELD INFLUENCE ON ANATOMICAL STEM STRUCTURE OF SCOTS PINE (*PINUS SYLVESTRIS* L.) AND RED OAK (*QUERCUS RUBRA* L.) ANNUAL SEEDLINGS

A.I. Smirnov¹, P.A. Aksenov²✉

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

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

axenov.pa@mail.ru

The study determines the influence of a low-frequency electromagnetic field on the anatomical stem structure of the annual seedlings of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) with a root-balled system, carried out in the nursery of the Ustyansky forest seed breeding center of the Arkhangelsk region, and annual seedlings of red oak (*Quercus rubra* L.) carried out in the forest nursery of the Donskoy forestry of the Forestry Department of the Lipetsk region, when planting in open ground with the introduction of a hydrogel. Experimental samples of annual seedlings of Scots pine and red oak were treated with a low-frequency electromagnetic field using the patented POSEP technology (pre-sowing treatment of seeds and seedlings with an electromagnetic field) using the «Rost-Active» device (low-frequency generator). Untreated seedlings served as control. Conducted in the laboratory of the Department of Forest Plantations, Breeding and Dendrology of the BMSTU (Mytishchi branch), histometric analyzes of experimental and control samples of annual seedlings of Scots pine and red oak showed a positive effect of a low-frequency electromagnetic field on the anatomical characteristics of their stems.

Keywords: low-frequency electromagnetic field (LF EMF), POSEP technology, histometry, anatomical structure, hydrogel

Suggested citation: Smirnov A.I., Aksenov P.A. *Vliyanie nizkochastotnogo elektromagnitnogo polya na anatomicheskoe stroenie steblya odnoletnikh seyantsev sosny obyknovnoy (Pinus sylvestris L.) i duba krasnogo (Quercus rubra L.)* [Low-frequency electromagnetic field influence on anatomical stem structure of scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and red oak (*Quercus rubra* L.) annual seedlings]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 3, pp. 39–46. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-39-46

References

- [1] Presman A.S. *Elektromagnitnoe pole i zhizn'* [Electromagnetic field and life]. Moscow: Nauka, 2003, 215 p.
- [2] Baryshev M.G., Dzhimak S.S. *Issledovanie vliyaniya nizkochastotnogo elektromagnitnogo polya na biologicheskie ob'ekty* [Study of the influence of a low-frequency electromagnetic field on biological objects]. Krasnodar: Kuban state un-t, 2012, pp. 1–15.
- [3] Starukhin R.S., Belitsin I.V., Khomutov O.I. *Metod predposevnoy obrabotki semyan s ispol'zovaniem ellipticheskogo elektromagnitnogo polya* [Method of pre-sowing treatment of seeds using an elliptical electromagnetic field]. *Polzunovskiy Vestnik*, 2009, no. 4, p. 100.
- [4] Firsov V.F., Chekmarev V.V., Levin V.A. *Ispol'zovanie fizicheskikh faktorov i mikroelementov v povyshenii bolezneustoychivosti i produktivnosti vozdeleyvaemykh kul'tur* [The use of physical factors and microelements in increasing the disease resistance and productivity of cultivated crops]. *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki* [Questions of modern science and practice], 2005, no. 1, pp. 19–26.
- [5] Smirnov A.I., Orlov F.S. *Sposob predposevnoy obrabotki semyan i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method for presowing seed treatment and device for its implementation]. Pat. No. 2591969 of the Russian Federation, applicant and patent holder Raznoservis LLC, 2014, bull. no. 20.
- [6] Smirnov A.I., Orlov F.S. *Ustroystvo dlya predposevnoy obrabotki posevnogo materiala* [Device for pre-sowing treatment of seed material]. Pat. No. 155132 of the Russian Federation, applicant and patent holder Raznoservis LLC, 2014, bull. no. 26.
- [7] Smirnov A.I., Orlov F.S., Belyaev V.V., Aksenov P.A. *Vliyanie nizkochastotnogo elektromagnitnogo polya na biometricheskie kharakteristiki seyantsev sosny obyknovnoy (Pinus sylvestris L.)* [Influence of a low-frequency electromagnetic field on the biometric characteristics of seedlings of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.)]. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*, 2019, no. 2, pp. 78–84.
- [8] Smirnov A.I., Orlov F.S., Aksenov P.A., Yas'kov Yu.V. *Effektivnost' vliyaniya nizkochastotnogo elektromagnitnogo polya i gidrogelya na prizhivaemost' i rost odnoletnikh seyantsev duba krasnogo (Quercus rubra L.)* [The effectiveness of the influence of a low-frequency electromagnetic field and hydrogel on the survival and growth of annual seedlings of red oak (*Quercus rubra* L.)]. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*, 2020, no. 5, pp. 81–89.
- [9] De Lucas M., Etchells J.P. (Eds.) *Xylem — Methods and Protocols*. New York: Publishing Humana Press, 2017, p. 260.
- [10] Schweingruber F.H. *Wood Structure and Environment (Springer Series in Wood Science)*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2007, p. 280.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Willan R.L. *A Guide to Forest Seed Handling with Special Reference to the Tropics*. FAO, Rome: Forestry Paper, 1987, no. 20/2.
- [14] Mudhangani A., Maravanyika C., Ndagurwa H.G.T., Mwase R. The Influence of Hydrogel Soil Amendment on the Survival and Growth of Newly Transplanted *Pinus patula* Seedlings. *J. of Forestry Research*, 2018, v. 29, iss. 1, pp. 103–109. DOI: 10.1007/s11676-017-0428-1.

- [15] Fischer G., Tausz M., Köck M., Grill D. Effect of Weak 16 $\frac{2}{3}$ Hz Magnetic Fields on Growth Parameters of Young Sunflower and Wheat Seedlings. *Bioelectromagnetics*, 2004, v. 25, iss. 8, pp. 638–641. DOI: 10.1002/bem.20058/
- [16] Penuelas J., Llusia J., Martinez B., Fontcuberta J. Diamagnetic Susceptibility and Root Growth Responses to Magnetic Fields in *Lens culinaris*, *Glycine soja*, and *Triticum aestivum*. *Electromagnetic Biologu and Medicine*, 2004, v. 23, no. 2, pp. 97–112.
- [17] Gordon G.A. Seed manual for forest trees. UK, London: Forestry Commission, 1992, 132 p.
- [18] Smirnov A.I. *Vliyanie nizkochastotnogo elektromagnitnogo polya na vskhozhest' semyan i rost seyantsev sosny obyknovennoy v pitomnikakh zony smeshannykh lesov* [Influence of a low-frequency electromagnetic field on the germination of seeds and the growth of seedlings of Scotch pine in nurseries of the zone of mixed forests]. Dis. Sci. Cand. (Agric.). Moscow: MSFU, 2016, p. 17.
- [19] Danilova T.N., Kozyreva L.V. *Vozmozhnosti ispol'zovaniya gidrogeley dlya upravleniya vodoobespechennost'yu poley* [Possibilities of using hydrogels to control the water supply of fields]. *Plodorodie* [Fertility], 2008, no. 6, pp. 24–25.
- [20] Svalov N.N. *Variatsionnaya statistika* [Variational statistics]. Moscow: MSFU, 2001, p. 80.
- [21] GOST 16483.7–71 *Drevesina. Metody opredeleniya vlazhnosti* [Wood. Moisture Determination Methods], 1999, 4 p.
- [22] GOST R 56881–2016 *Biomassa. Opredelenie zol'nosti standartnym metodom* [Biomass. Determination of ash content by the standard method], 2016, 8 p.

Authors' information

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

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

Received 14.02.2022.

Approved after review 03.03.2022.

Accepted for publication 13.05.2022.

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

ИЗМЕНЕНИЕ ПЛОЩАДИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ В УДМУРТСКОЙ РЕСПУБЛИКЕ

С.М. Жижин, С.В. Залесов✉, А.Г. Магасумова

ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» 620110 г. Екатеринбург,
ул. Сибирский тракт, д. 37

Zalesov@usfeu.ru

Проанализировано распределение сельскохозяйственных угодий Удмуртской Республики по видам, лесным районам и площади. Установлено, что за период с 1992 по 2019 гг. площадь обрабатываемых сельскохозяйственных угодий сократилась практически на четверть, в абсолютной величине больше всего сократилась пашня, в относительных — залежи и сенокосы. Приведены данные о безвозвратно утраченных сельскохозяйственных угодьях — 27,0 тыс. га (6,2 %). Определена площадь бывших сельскохозяйственных угодий — 327,6 тыс. га, на которой количество подроста позволяет перевести их в ранг покрытых лесной растительностью земель. Установлена площадь пашни, на которой древесная растительность находится на стадии формирования — 79,9 тыс. га. Рекомендуются сельскохозяйственные угодья, заросшие древесной растительностью, исключить из сельскохозяйственного оборота, а пашни, зарастающие древесной растительностью, исходя из показателей эффективного плодородия почв, либо передать под создание плантаций для ускоренного выращивания древесины, либо вернуть в сельскохозяйственный оборот.

Ключевые слова: сельхозпользование, пашни, сенокосы, пастбища, зарастание, древесная растительность

Ссылка для цитирования: Жижин С.М., Залесов С.В., Магасумова А.Г. Изменение площади сельскохозяйственных угодий в Удмуртской Республике // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 3. С. 47–53. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-47-53

Начиная с 1990-х годов в связи с кризисом в сельском хозяйстве РФ и банкротством основных сельхозпроизводителей огромные площади пашен, пастбищ и сенокосов были изъяты из сельскохозяйственного оборота и подверглись интенсивному зарастанию древесной растительностью. По официальным данным, к 2010 г. площадь заброшенных пашен составила 31,6 млн га [1]. По данным А.Ю. Ярошенко [2], в 2020 г. площадь заброшенных сельскохозяйственных угодий в РФ составила 76,0 млн га, а к началу 2030-х годов она, предположительно, превысит 100 млн га. При этом, по разным оценкам, около 30...33 млн га сельскохозяйственных угодий можно перевести в покрытые лесной растительностью земли.

Интенсивность формирования древесной растительности зависит от многих факторов, в частности климатических, а также от лесорастительных условий, видов пользования, площади конкретного угодья, состава, возраста и других таксационных показателей прилегающих древостоев.

Исследования формирования древесной растительности на бывших сельскохозяйственных угодьях интенсивно ведутся более 30 лет. Однако у ученых нет единого мнения о составе формирующихся на бывших сельскохозяйственных угодьях молодняков [3]. Так, по данным авторов работ [4–6], основными лесообразующими породами на

бывших сельскохозяйственных угодьях являются береза повислая (*Betula pendula* Roth.) и береза пушистая (*B. pubescens* Ehrh.), ольха серая (*Alnus incana* (L.) Moench.). В то же время другие отмечают, что при доминировании березы повислой на бывших сельскохозяйственных угодьях значительной встречаемостью характеризуются ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.) и ель обыкновенная (*P. abies* (L.) Karst.) [7]. При наличии зарастающих полей вблизи сосновых насаждений в формирующихся молодняках доминируют деревья сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) [8].

Зарастание значительных по площади сельскохозяйственных угодий протекает неравномерно. Нередко наблюдается закустаривание участков или зарастание травянистой растительностью на длительный срок с единично встречающимися древесными растениями. Известно [9–11], что на бывших сельскохозяйственных угодьях можно формировать высокопроизводительные насаждения и даже создать базу для развития лесоперерабатывающих предприятий [12, 13]. К сожалению, планирование плантационного лесовыращивания на бывших сельскохозяйственных угодьях сдерживается отсутствием объективных данных о реальных объемах сформировавшихся и формирующихся на них древостоев [6, 14] по субъектам РФ. Большинство опубликованных материалов констатируют лишь примерные данные о сокращении площади сельскохозяйственных угодий, на основании которых

Изменение площади сельскохозяйственных угодий в Удмуртской Республике за период с 1992 по 2019 гг.

Change in the area of agricultural land in the Udmurt Republic for the period from 1992 to 2019

Вид сельскохозяйственных угодий	Площадь утраченных сельхозугодий								Общая площадь, выбывшая из оборота	
	Общая площадь на 1992 г.		Заросшая древесной растительностью		Зарастающая древесной растительностью		Выбывшая в связи со строительством площадных и линейных объектов			
	га	%	га	%	га	%	га	%	га	%
Пашня	1467225,5	83,1	253896,2	17,3	79873,3	5,4	21383,8	1,5	355153,3	24,2
Пастбища	208217,5	11,8	44635,4	21,4	–	–	4216,5	2,0	48851,9	23,5
Сенокосы	88914,2	5,0	28599,0	32,2	–	–	1333,8	1,5	29932,8	33,7
Залежь	1271,4	0,1	419,7	33,0	–	–	43,9	3,5	463,6	36,5
Итого	1765628,6	100	327550,3	18,6	79873,3	4,5	26978,0	1,5	434401,6	24,6

невозможно спланировать и организовать научно обоснованное ведение лесопользования на бывших сельскохозяйственных угодьях.

Цель работы

Цель работы — установление динамики реальных показателей площади сельскохозяйственных угодий в Удмуртской Республике за период 1992–2019 гг. и разработка на этой основе предложений по совершенствованию их использования.

Объекты и методика исследований

Удмуртская Республика расположена в восточной части Восточно-Европейской равнины в междуречье Камы и Вятки. Значительная площадь республики обусловила выделение в ее пределах двух лесных районов: южно-таежного и хвойно-широколиственных (смешанных) лесов. Климат республики умеренно континентальный. Среднегодовое количество осадков 491 мм. Основными типами почв являются дерново-подзолистые, серые лесные оподзоленные и дерново-карбонатные. В целом лесорастительные условия благоприятны для выращивания высокопроизводительных еловых и сосновых насаждений.

Объектом исследований служили сельскохозяйственные угодья всех муниципальных образований Удмуртской Республики. За основу были взяты материалы статистической отчетности и инвентаризации земель сельскохозяйственного назначения за период 1990–1992 гг. Указанные материалы послужили базой для определения изменения площади сельскохозяйственных угодий по их видам.

На основании данных спутниковых снимков в 2019 г. была проведена инвентаризация земель сельскохозяйственного назначения и выполнен анализ их динамики за период с 1992 по 2019 гг.

Среди муниципальных образований (районов) было выбрано два «ключевых», т. е. наиболее типичных для конкретных лесных районов.

Для южно-таежного лесного района был выбран Игринский муниципальный район, для лесного района хвойно-широколиственных (смешанных) лесов — Камберский муниципальный район.

На территории этих муниципальных районов были заложены пробные площади в целях уточнения материалов дешифрирования космических снимков и установления соответствия результатов дешифрирования фактическим данным. При закладке пробных площадей (ПП) использовались широко известные апробированные методики [15, 16].

Для определения целесообразности выращивания сельскохозяйственных культур на заброшенных пашнях был использован показатель эффективного плодородия почвы, расчет которого проводился с учетом требований методических рекомендаций, разработанных сотрудниками АО Агрохимцентр «Удмуртский».

Результаты и обсуждение

Выполненные исследования показали, что, как и в остальных субъектах РФ, в Удмуртской Республике в период 1992–2019 гг. наблюдалось сокращение площади сельскохозяйственных угодий. Если в 1992 г. общая площадь сельскохозяйственных угодий составляла 1 765 628,6 га, то в 2019 г. она не превышала 1 331 227,0 га (таблица).

По приведенным в таблице данным, можно сделать следующие выводы.

Интенсивное сокращение площади залежей объясняется тем, что уже многие годы их не обрабатывают. Высокая доля сокращения площади сенокосов объясняется несколькими причинами. Во-первых, резко сократилось поголовье скота — как у основных сельхозпроизводителей, так и в подсобных хозяйствах. Во-вторых, большинство сенокосов характеризуется мелкоконтурностью участков, расположенных среди лесных насаждений, что способствует налету семян древесных растений и формированию подроста в случае прекращения сенокосения. В-третьих, вследствие

удаленности сенокосов от населенных пунктов, в связи с чем они были заброшены населением, а заготовку сена переносили на заброшенные пашни, расположенные вблизи населенных пунктов; переносу заготовки сена на заброшенные пашни способствовало также упрощение механизации работ на пашне по сравнению с сенокосами.

Сокращение площади пастбищ также объясняется снижением поголовья скота. В относительных величинах сокращение площади пастбищ даже ниже, чем сокращение площади пашен, что объясняется близостью пастбищ к населенным пунктам.

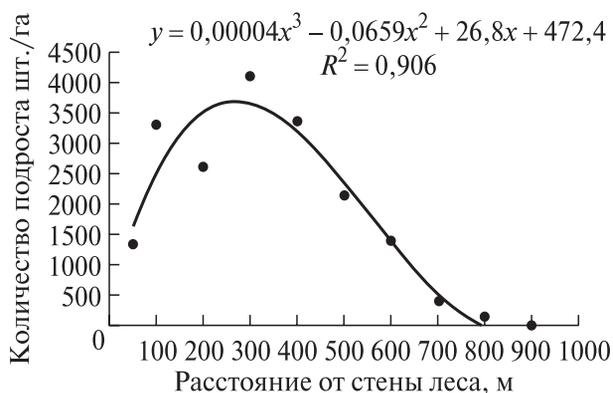
Основной причиной сокращения сельскохозяйственного использования земель является недостаток финансовых ресурсов у сельхозпроизводителей, необходимых для повышения плодородия почвы. Как в южно-таежном, так и хвойно-широколиственном лесных районах РФ в пределах Удмуртской Республики доминирует подзолистый процесс почвообразования, а следовательно, для поддержания почвенного плодородия сельскохозяйственных угодий необходимо систематическое внесение удобрений в почвы и их известкование. При отсутствии средств на эти работы урожайность сельскохозяйственных культур будет снижаться, поэтому проведение сельскохозяйственных работ будет нерентабельным.

Общую площадь сокращения сельскохозяйственных угодий за период 1992–2019 гг. можно подразделить на три группы: 1) площади, где на момент обследования таксационные показатели древостоев в соответствии с действующими нормативными документами [18] позволяют перевести участки в покрытые лесной растительностью земли; 2) пашни, на которых наблюдается начальная стадия формирования древесной растительности, т. е. здесь возникли единичные или расположенные группами древесные растения; 3) бывшие сельскохозяйственные угодья, необратимо исключенные из сельхозпользования в связи с передачей их под строительство линейных или площадных объектов.

Доля площади каждой из групп существенно различается. Так, площадь сельскохозяйственных угодий, которые можно перевести в покрытые лесной растительностью земли (первая группа), составляет 327 550,3 га или 75,4 % общей площади угодий, исключенных из сельскохозяйственного оборота.

Доля земель, зарастающих древесной растительностью, составляет по Удмуртской Республике 79 873,3 га (18,4 %), а на долю сельскохозяйственных угодий, переданных под строительство, приходится 26 978,0 га или 6,2 % общей площади, исключенной из сельскохозяйственного использования.

Таким образом, исключенные из сельскохозяйственного оборота земли в пределах территории Удмуртской Республики интенсивно зарастают древесной растительностью. В качестве примера можно привести данные о количестве подроста сосны на бывшей пашне в зависимости от расстояния до стены леса (рисунок).



Количество жизнеспособного подроста сосны на бывшей пашне в зависимости от расстояния до стены леса
The number of viable pine undergrowth on the former arable land depending on the distance to the forest edge

Из рисунка следует, что спустя 15 лет после прекращения сельскохозяйственного использования на бывшей пашне количество жизнеспособного подроста сосны на расстоянии 200...350 м от стены 70-летнего соснового древостоя превышает 3,5 тыс. шт./га. При этом зафиксировано формирование подроста сосны даже на расстоянии 800 м от стены леса, а следовательно, в полосе до 600 м можно ожидать формирования сосновых насаждений.

Сокращение площади сельскохозяйственных угодий почти на четверть за период 1992–2019 гг. в пределах территории Удмуртской Республики обуславливает необходимость разработки предложений по минимизации ущерба экономике. На основе результатов, полученных из выполненных исследований, в целях минимизации ущерба от сокращения сельхозпользования можно рекомендовать следующее.

На участках, где сформировался древостой, необходимо проводить лесоводственные мероприятия, направленные на выращивание высокопроизводительных устойчивых насаждений. В пользу представленного предложения свидетельствует высокая себестоимость работ по расчистке данных участков от древесной растительности, раскорчевке пней и выравниванию территории. Экономически более рациональным будет выращивание товарной древесины на основе уже сформировавшихся молодняков. В ходе работ следует проводить рубки ухода, направленные на ускорение выращивания хозяйственно

ценной древесины при коротком обороте рубки. Последнее позволит избежать развития очагов корневой губки (*Heterobasidion annosum*), что является достаточно частым явлением в хвойных насаждениях на старопахотных землях.

Сельскохозяйственные угодья, отнесенные нами к третьей группе, т. е. переданные под создание площадных и линейных объектов, были исключены из перечня сельскохозяйственных земель, а следовательно, рассмотрение их в качестве будущих сельскохозяйственных угодий не имеет смысла.

Наибольший интерес представляют участки общей площадью 79 873,3 га, на которых формирование древесной растительности находится на начальной стадии. Возвращение данных участков в сельскохозяйственное использование не вызывает сложностей, поскольку подрост здесь чаще всего встречается в виде единичных экземпляров. Возврат указанных земель в пашню определяется лишь экономической целесообразностью. Для установления целесообразности распашки данных участков нами использован показатель эффективного плодородия. Если показатель эффективного плодородия позволяет выращивать на конкретном участке урожай зерновых культур равный или больше среднего урожая зерновых по муниципальному району за последние 4 года без дополнительных затрат на повышение почвенного плодородия, то данные участки целесообразно вернуть в исходное состояние, т. е. использовать в качестве пашни.

Если эффективное плодородие почвы свидетельствует о том, что ожидаемый урожай зерновых при использовании пашни по прямому назначению будет ниже среднего урожая зерновых за последних 4 года (2015–2019) по муниципальному району, то на участке следует начать создание плантационных лесных культур с коротким оборотом рубки, нацеленных на выращивание, в частности, балансов. Указанное можно реализовать если у сельхозпользователя нет средств на коренное улучшение почвы и повышение ее плодородия.

Выращивание древесины на заброшенной пашне позволит в значительной степени компенсировать убытки от сокращения площади сельскохозяйственных угодий.

Выполненный анализ оценки качества зарастающей древесной растительностью пашни по показателю эффективного плодородия показал, что из 79 873,3 га указанных земель 36 051,0 га (45,1 %) целесообразно вернуть для сельскохозяйственного использования, а 43 822,3 га (54,9 %) —передать для плантационного лесовыращивания.

Выводы

1. За период с 1992 по 2019 гг. в структуре и площади сельскохозяйственных угодий Удмуртской Республики произошли существенные изменения.

2. Общая площадь сельскохозяйственных угодий за анализируемый период сократилась практически на четверть. Максимальное сокращение в абсолютных величинах зафиксировано по площади пашни, а в относительных величинах по залежам и сенокосам.

3. Условно все исключенные из сельскохозяйственного оборота земли можно разделить на три группы: заросшие древесной растительностью, зарастающие древесной растительностью и переданные под строительство линейных или площадных объектов.

4. Заросшие лесной растительностью земли следует перевести в покрытые лесной растительностью и вести на них научно обоснованное лесное хозяйство.

5. Зарастающие лесной растительностью пашни следует проанализировать по показателям эффективного плодородия. Участки, где потенциальная урожайность зерновых культур ниже таковой по муниципальному образованию (району) за последние 4 года, при отсутствии у сельхозпроизводителя средств на коренное улучшение почвы, следует передать под плантационное лесовыращивание быстрорастущих древесных пород с коротким оборотом рубки.

6. Если показатели эффективного плодородия почвы обеспечивают урожай зерновых, равный или больше такового в среднем по муниципальному образованию за последние 4 года, то данный участок должен возвращаться в сельскохозяйственный оборот.

7. Земли, переданные под строительство линейных и площадных объектов, следует признать необратимо утраченными для сельского хозяйства.

Список литературы

- [1] Щепашенко Д.Г., Швиденко А.З., Лесив М.Ю. Площадь лесов России и ее динамика на основе синтеза продуктов дистанционного зондирования // Лесоведение, 2015. № 3. С. 163–171.
- [2] Ярошенко А.Ю. В начале ноября в Тульской области прошел полевой семинар по лесоводству на сельхозземлях. URL: <http://www.forestforum.ru/viewtopic.php?f=9st=26098&view=unread&sid=93v23127dd4avded> (дата обращения 04.01.2022).
- [3] Potapov P.V., Turubanova S.A., Tyukavina A. Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive // Remote Sensing of Environment, 2015, v. 159, pp. 28–43.
- [4] Уткин Л.И., Гульбе Т.А., Гульбе Я.И., Ермолова Л.С. О наступлении лесной растительности на сельскохозяйственные земли в Верхнем Поволжье // Лесоведение, 2002. № 5. С. 44–52.

- [5] Перепечина Ю.И., Глушенков О.И., Корсиков Р.С. Оценка лесов, расположенных на землях сельскохозяйственного назначения в Брянской области // Лесотехнический журнал, 2015. Т. 5. № 1. С. 74–84.
- [6] Маслов А.А., Гульбе А.Я., Гульбе Я.И., Медведева М.А., Сирин А.А. Оценка ситуации с зарастанием сельскохозяйственных земель лесной растительностью на примере Угличского района Ярославской области // Устойчивое лесопользование, 2016. № 4 (48). С. 6–14.
- [7] Новоселова Н.Н., Залесов С.В., Магасумова А.Г. Формирование древесной растительности на бывших сельскохозяйственных угодьях. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2016. 106 с.
- [8] Жучков Е.А., Павловский С.А., Степанов А.С., Стародубцева Н.И., Абрамова Л.П. Естественное возобновление на старопахотных землях Джабык-Карагайского бора // Социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2003. С. 272–273.
- [9] Zalesov S.V., Magasumova A.G., Opletaev A.S. Effectiveness of larch stands creation on former agricultural lands // Ecological Agriculture and sustainable development: Research Development Center, 2019, no. 1, pp. 69–76.
- [10] Рогозин М.В., Разин Г.С. Лесные культуры Теплоуховых в имении Строгановых на Урале: история, законы развития, селекция ели. Пермь: Пермский ГУ, 2011. 192 с.
- [11] Zalesov S.V., Magasumova A.G., Opletaev A.S., Platonov E.P. Increasing the efficiency of former agricultural band using // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2021, v. 876, p. 012082. DOI:10.1088/1755-1315/876/1/012082
- [12] Степаненко С.М. Структура хвойных древостоев Северо-Запада России, созданных методом плантационного лесовыращивания: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. СПб.: СПбГЛТУ, 2013. 20 с.
- [13] Zalesov S., Magasumova A. Protective forest management problems in Russia // E 35 Web of Conferences 258, 2021, v. 08004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125808004>
- [14] Жижин С.М., Залесов С.В., Магасумова А.Г. Изменение площади сельскохозяйственных угодий по лесным районам в Республике Удмуртия // Успехи современного естествознания, 2021. № 2. С. 12–18. DOI: 10.17513/use.37568
- [15] ОСТ 56-69–83 Площади пробные лесоустроительные. Метод закладки. М.: Экология, 1992. 17 с.
- [16] Фомин В.В., Залесов С.В., Магасумова А.Г. Методики оценки густоты подроста и древостоев при зарастании сельскохозяйственных земель древесной растительностью с использованием космических снимков высокого пространственного разрешения // Аграрный вестник Урала, 2015. № 1 (131). С. 25–29.
- [17] Оценка плодородия почв и эффективности использования удобрений (методические указания). Ижевск: Изд-во АО Агрохимцентр «Удмуртский», 2009. 28 с.
- [18] Об утверждении Правил лесовосстановления, состава проекта лесовосстановления, порядка разработки проекта лесовосстановления и внесения в него изменений: Приказ Минприроды России от 4.12.2020 № 1014 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573123762> (дата обращения 04.01.2022).

Сведения об авторах

Жижин Сергей Михайлович — аспирант кафедры лесоводства ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»

Залесов Сергей Вениаминович [✉] — д-р с.-х. наук, зав. кафедрой лесоводства ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», Zalesov@usfeu.ru

Магасумова Альфия Гаптрауфовна — канд. с.-х. наук, доцент кафедры лесоводства ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», magasumovaag@m.usfeu.ru

Поступила в редакцию 18.02.2022.

Одобрено после рецензирования 15.03.2022.

Принята к публикации 27.04.2022.

AGRICULTURAL LAND CHANGE IN UDMURT REPUBLIC

C.M. Zhizhin, S.V. Zalesov✉, A.G. Magasumova

Ural State Forest Engineering University 37, Siberian Trakt st., 620110, Yekaterinburg, Russia

Zalesov@usfeu.ru

Based on the inventory of agricultural land materials for 1992 and the space images of high spatial resolution interpretation it was analyzed the distribution of agricultural land in the Udmurt republic by types and area. It is noted that over a 27 year period the area of cultivated agricultural land has decreased in the Republic by almost quarter at the same time in absolute terms arable land decreased most of all while in relative terms fallow lands and hayfields. 27,0 th of ha (6,2 %) of total area of unused agricultural land was lost irretrievably as it was transferred for the construction linear and area facilities. The amount of undergrowth on 327,6 th./ha of former agricultural lands. The amount of undergrowth allows to transfer them to areas covered with forest vegetation lands. Taking into account the age of the formed young stands and their taxation indicators it is advisable to carry on scientifically based forestry on the indicated areas with thinning aimed at accelerating of tactical mature wood cultivation. On 79,9 th./ha of arable lands, woody vegetation is at the stage of formation. Taking into account the effective soil fertility, these areas should be divided into 2 groups. The first group will consist of a plot where effective soil fertility makes possible to grow a crop equal to or greater than the average grain yields in the municipal district over past four years escaping measures to improve soil fertility. Such plots should be returned to agricultural use. The second group with a total of 43,8 th./ha is a plot where without radical soil improvement grain yields are less than the average yield for the municipal district over the past four years. It is advisable to give them for the creation of forest plantations from fast growing tree species with a short turnover of felling.

Keywords: agricultural use, plough land, hay field, pasture, overgrowth, woody vegetation

Suggested citation: Zhizhin C.M., Zalesov S.V., Magasumova A.G. *Izmenenie ploshchadi sel'skokhozyaystvennykh ugodiy v Udmurtskoy Respublike* [Agricultural land change in Udmurt Republic]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 3, pp. 47–53. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-47-53

References

- [1] Shchepashchenko D.G., Shvidenko A.Z., Lesiv M.Yu. *Ploshchad' lesov Rossii i ee dinamika na osnove sinteza produktov distantsionnogo zondirovaniya* [Forest area in Russia and its dynamics based on the synthesis of remote sensing products]. *Lesovedenie* [Forest science], 2015, no. 3, pp. 163–171.
- [2] Yaroshenko A. *V nachale noyabrya v Tul'skoy oblasti proshel polevoy seminar po lesovodstvu na sel'khozemlyakh* [In early November, a field seminar on forestry on agricultural lands was held in the Tula region]. Available at: <http://www.forestforum.ru/viewtopic.php?f=9st=26098&view=unread&sid=93v23127dd4avded> (accessed 04.01.2022).
- [3] Potapov P.V., Turubanova S.A., Tyukavina A. Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive. *Remote Sensing of Environment*, 2015, v. 159, pp. 28–43.
- [4] Utkin L.I., Gul'be T.A., Gul'be Ya.I., Ermolova L.S. *O nastuplenii lesnoy rastitel'nosti na sel'skokhozyaystvennye zemli v Verkhnem Povolzh'e* [On the offensive of forest vegetation on agricultural lands in the upper Volga region]. *Lesovedenie* [Forest science], 2002, no. 5, pp. 44–52.
- [5] Perepechina Yu.I., Glushenkov O.I., Korsikov R.S. *Otsenka lesov, raspolozhennykh na zemlyakh sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya v Bryanskoy oblasti* [Assessment of forests located on agricultural lands in the Bryansk region]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest-technical journal], 2015, v. 5, no. 1, pp. 74–84.
- [6] Maslov A.A., Gul'be A.Ya., Gul'be Ya.I., Medvedeva M.A., Sirin A.A. *Otsenka situatsii s zarastaniem sel'skokhozyaystvennykh zemel' lesnoy rastitel'nosti yu na primere Uglichskogo rayona Yaroslavskoy oblasti* [Assessment of the situation with the overgrowing of agricultural land with forest vegetation on the example of the Uglich district of the Yaroslavl region]. *Ustoychivoe lesopol'zovanie* [Sustainable forest management], 2016, no. 4 (48), pp. 6–14.
- [7] Novoselova N.N., Zalesov S.V., Magasumova A.G. *Formirovaniye drevesnoy rastitel'nosti na byvshikh sel'skokhozyaystvennykh ugod'yakh* [Formation of woody vegetation on former agricultural lands]. Yekaterinburg: USFEU, 2016, 106 p.
- [8] Zhuchkov E.A., Pavlovskiy S.A., Stepanov A.S., Starodubtseva N.I., Abramova L.P. *Estestvennoye vozobnovleniye na staropakhotnykh zemlyakh Dzhabyk-Karagayskogo bora* [Natural regeneration on the old arable lands of the Dzhabyk-Karagay pine forest]. *Sotsial'no-ekonomicheskie i ekologicheskie problemy lesnogo kompleksa* [Socio-economic and environmental problems of the forest complex]. Yekaterinburg: USFEU, 2003, pp. 272–273.
- [9] Zalesov S.V., Magasumova A.G., Opletaev A.S. *Effektivnost' larch stands creation on former agricultural lands* [Effectiveness of larch stands creation on former agricultural lands]. *Ecological Agriculture and sustainable development: Research Development Center* [Ecological Agriculture and sustainable development: Research Development Center], 2019, no. 1, pp. 69–76.
- [10] Rogozin M.V., Razin G.S. *Lesnye kul'tury Teploukhovykh v imenii Stroganovykh na Urale: istoriya, zakony razvitiya, selektsiya eli* [Forest crops of the Teploukhovs in the Stroganovs' estate in the Urals: history, laws of development, spruce breeding]. Perm': Perm State University, 2011, 192 p.
- [11] Zalesov S.V., Magasumova A.G., Opletaev A.S., Platonov E.P. Increasing the efficiency of former agricultural land using. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2021, v. 876, p. 012082. DOI:10.1088/1755-1315/876/1/012082
- [12] Stepanenko S.M. [The structure of coniferous forest stands in the North-West of Russia, created by the method of plantation forestry]. *Dis. Cand. Sci. (Agric.)*. St. Petersburg: SPbGLTU, 2013, 20 p.
- [13] Zalesov S., Magasumova A. Protective forest management problems in Russia. *E 35 Web of Conferences* 258, 2021, v. 08004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125808004>

- [14] Zhizhin S.M., Zalesov S.V., Magasumova A.G. *Izmenenie ploshchadi sel'skokhozyaystvennykh ugodiy po lesnym rayonam v Respublike Udmurtiya* [Changes in the area of agricultural land in forest areas in the Republic of Udmurtia]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Successes of modern natural science], 2021, no. 2, pp. 12–18. DOI: 10.17513/use. 37568
- [15] OST 56-69–83 *Ploshchadi probnye lesoustroitel'nye. Metod zakladki* [Trial forest management areas. bookmark method]. Moscow: Ecology, 1992, 17 p.
- [16] Fomin V.V., Zalesov S.V., Magasumova A.G. *Metodiki otsenki gustoty podrosta i drevostoevprizarastaniya sel'skokhozyaystvennykh zemel' drevesnoy rastitel'nosti s ispol'zovaniem kosmicheskikh snimkov vysokogo prostranstvennogo razresheniya* [Methods for assessing the density of undergrowth and forest stands when agricultural land is overgrown with woody vegetation using satellite images of high spatial resolution]. *Agrarnyy vestnik Urala* [Agrarian Bulletin of the Urals], 2015, no. 1 (131), pp. 25–29.
- [17] *Otsenka plodorodiya pochvy i effektivnosti ispol'zovaniya udobreniy (metodicheskie ukazaniya)* [Evaluation of soil fertility and efficiency of fertilizer use (guidelines)]. Izhevsk: OAO Agrohimitsentr Udmurtsky, 2009, 28 p.
- [18] *Ob utverzhdenii Pravil lesovosstanovleniya, sostava proekta lesovosstanovleniya, poryadka razrabotki proekta lesovosstanovleniya i vneseniya v nego izmeneniy: Prikaz Minprirody Rossii ot 4.12.2020 № 1014* [On approval of the Rules for reforestation, the composition of the reforestation project, the procedure for developing a reforestation project and making changes to it: Order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated December 4, 2020 No. 1014]. Elektronnyy fond pravovykh i normativno-tekhnicheskikh dokumentov [Electronic Fund of Legal and Regulatory and Technical Documents]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/573123762> (accessed 01.04.2022).

Authors' information

Zhizhin Sergey Mikhailovich — Pg., Department of Forestry, Ural State Forestry Engineering University
Zalesov Sergey Veniaminovich ✉ — Dr. Sci. (Agriculture), Head of the Department of Forestry, Ural State Forestry University, Zalesov@usfeu.ru

Magasumova Alfiya Gaptraufovna — Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor of the Department of Forestry, Ural State Forestry Engineering University, magasumovaag@m.usfeu.ru

Received 18.02.2022.

Approved after review 15.03.2022.

Accepted for publication 27.04.2022.

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

МОНИТОРИНГ СЛЕДОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ТЕРРИТОРИИ УДМУРТСКОЙ РЕСПУБЛИКИ МЕТОДОМ НЕЙТРОННОГО АКТИВАЦИОННОГО АНАЛИЗА

А.Н. Журавлева^{1✉}, И.Л. Бухарина¹, В. Свозилик²,
М.В. Фронтасьева³, Е.А. Загребин¹

¹ФГБОУ ВО Удмуртский государственный университет, 426034, Удмуртская Республика, г. Ижевск, ул. Университетская, д. 1

²Лаборатория информационных технологий имени М.Г. Мещерякова, Объединенный институт ядерных исследований, 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6

³Лаборатория нейтронной физики имени И.М. Франка, Объединенный институт ядерных исследований, 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6

zhuravleva_anastasija@mail.ru

Представлены результаты оценки степени загрязнения атмосферы на территории Удмуртской Республики методом мхов-биомониторов в сочетании с инструментальным нейтронно-активационным анализом. В образцах мха определены концентрации 37 макро-, микро- и следовых элементов. Рассчитаны факторы накопления отдельных элементов с помощью фоновых значений их концентраций. Фоновая концентрация определена путем нахождения трех минимальных значений и нахождения среднего с использованием методов описательной статистики. На основании аналитических результатов с помощью ГИС-технологий построены карты пространственного распределения тяжелых металлов и других токсичных элементов на исследуемой территории. Использован факторный анализ в качестве метода многомерного статистического анализа для выявления основных источников загрязнений — крупных промышленных объектов, расположенных на территории Удмуртской Республики. Настоящее исследование является продолжением работ для других регионов России с применением многоэлементного инструментального нейтронного активационного анализа и современных ГИС-технологий.

Ключевые слова: биомониторинг, мхи-биомониторы, загрязнение атмосферы, тяжелые металлы, нейтронный активационный анализ

Ссылка для цитирования: Журавлева А.Н., Бухарина И.Л., Свозилик В., Фронтасьева М.В., Загребин Е.А. Мониторинг следовых элементов на территории Удмуртской Республики методом нейтронного активационного анализа // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 3. С. 54–61.
DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-54-61

Использование метода мхов-биомониторов уже на протяжении более 40 лет позволяет успешно проводить исследования атмосферных выпадений тяжелых металлов (ТМ) и следовых элементов в странах Восточной и Западной Европы [1–7]. В России этот метод был использован для определения атмосферных выпадений элементов на территории Ленинградской обл., Кольского п-ова, Карелии, в районе Южного Урала и в Центральной России [8–14].

Оценка состояния атмосферного воздуха требует многоэлементного анализа состава аэрозольных частиц и определения в них концентраций тех элементов, которые являются токсичными для живых организмов.

Единая методика, предложенная скандинавскими учеными — метод мхов-биомониторов с использованием видов мха, широко распространенных в странах с умеренным климатом, — позволяет проводить одновременный сбор мхов в различных странах Европы и России

с последующим анализом и прогнозом состояния атмосферного воздуха на обширных территориях. Мхи ввиду особенностей их строения представляют собой уникальные системы — аналоги аэрозольных фильтров, поэтому их элементный состав хорошо отражает состояние атмосферы. Они широко распространены, являются легкими и доступными объектами при проведении пробоотбора. Это определяет их универсальность и высокий интерес исследователей [1–3].

В рамках международной программы ООН «Атмосферные выпадения тяжелых металлов в Европе: оценка на основе анализа мхов-биомониторов» проводятся качественная и количественная оценки распределения региональных атмосферных выпадений ТМ в Европе, выделяются местоположения важных источников загрязнений и осуществляется ретроспективное сравнение с аналогичными результатами исследований, повторяющихся каждые 5 лет. К тому же каждые 5 лет на основе результатов анализа мхов-биомониторов под эгидой Комиссии ООН по трансграничному переносу атмосферных

выпадения в Европе (UNECE ICP Vegetation) издается Европейский атлас пространственных и временных тенденций накопления тяжелых металлов во мхах Европы (1990–2005) [15].

В России для решения проблем, связанных с изучением химического состава биосферы для понимания значения различных элементов в функционировании организмов и экосистем в условиях антропогенного воздействия, активно используются ядерно-физические методы, освоены и развиты на радиоаналитическом комплексе в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ) в г. Дубна Московской обл. Инструментальный нейтронный активационный анализ (НАА) на импульсном быстром реакторе ИБР-2 позволяет определять концентрации более 40 элементов, и вследствие высокой чувствительности, точности, универсальности, возможности достижения низких пределов обнаружения при высокой информативности анализа с успехом используется для массового многоэлементного анализа мхов-биомониторов [8].

Цель работы

Цель работы — изучение атмосферных выпадений тяжелых металлов и токсичных элементов на территории Удмуртской Республики.

Материалы и методы

Описание изучаемой территории. Исследования проведены в пределах южной и центральной частей Удмуртской Республики. Климат изучаемых территорий — умеренно-континентальный. Средняя температура июля — 17 °С, января — –15 °С. Годовое количество осадков 500...600 мм. Преобладают суглинистые и дерново-подзолистые почвы. Удмуртская Республика расположена в пределах двух лесорастительных районов: в таежной зоне — южно-таежном районе европейской части Российской Федерации (северная часть) и зоне хвойно-широколиственных лесов — районе хвойно-широколиственных (смешанных) лесов европейской части Российской Федерации (южная часть) [16].

Удмуртская Республика характеризуется развитой промышленностью и многоотраслевым сельскохозяйственным производством. В структуре промышленного производства важное место занимает лесная и деревообрабатывающая промышленность. К ведущим отраслям промышленности относятся: машиностроение, металлообработка, черная металлургия и деревообработка. Металлургическое производство сосредоточено в г. Ижевске, литейное производство — в городах Ижевске и Воткинске. Энергетика представлена комплексом тепловых электростанций в таких крупных городах, как Ижевск, Сарапул, Глазов

и Воткинск. Заготовки леса ведутся в северных и западных районах. Значительное количество предприятий связано с военно-промышленным комплексом России.

АО «Концерн «Калашников» — крупнейший российский производитель автоматического и высокоточного оружия, артиллерийских снарядов — производит 95 % всего стрелкового оружия. Приборостроительное предприятие оборонно-промышленного комплекса АО «Ижевский мотозавод «Аксион-холдинг» производит различные виды приборной техники. Предприятие оборонно-промышленного комплекса АО «Ижевский электромеханический завод «Купол» занимается производством систем противовоздушной обороны. Металлургический завод ПАО «Ижсталь» осуществляет производство стали, проволоки, поковок, штамповки, стальных фасонных профилей. Автомобилестроительное предприятие ООО «ЛАДА Ижевский Автомобильный Завод» выпускает легковые автомобили. Предприятие по переработке полимерного сырья АО «Ижевский завод пластмасс» производит физически сшитый пенополиэтилен и пенополиуретан. Камбарский машиностроительный завод — предприятие по производству техники для узкоколейных железных дорог.

Тем не менее, несмотря на обилие промышленных предприятий различной направленности, некоторые исследователи относят структуру атмосферных выбросов к газотранспортному типу с преобладанием предельных углеводородов [17].

При этом земли лесного фонда составляют по площади 2030 тыс. га, лесистость — 46,2 %. Незначительно преобладают хвойные насаждения (53 % общего запаса), в особенности сосредоточенные в северной части региона, среди которых по породному составу преобладает ель, формирующая высокопродуктивные ельники кисличного и черничного типов. В целом распределение лесной растительности на территории неравномерно. Насаждения изучаемых центрального и южного районов зачастую представляют собой небольшие смешанные лесные массивы с преобладанием лиственных пород — березы, осины, липы [18]. Всесторонние натурные исследования насаждений проводят относительно недавно, в рамках изучения деградации темнохвойных лесов и смены растительного сообщества [19–21]. Оценка аэрационного загрязнения тяжелыми металлами с использованием мхов и лишайников проводилась только локально, в частности на территории г. Ижевска [22–23].

Отбор проб и их подготовка к анализу. Для определения атмосферных выпадений ТМ и других следовых элементов на территории Удмуртской Республики была собрана коллекция из 26 образцов мхов-биомониторов видов *Hylocomium splendens* и *Pleurozium schreberi*.

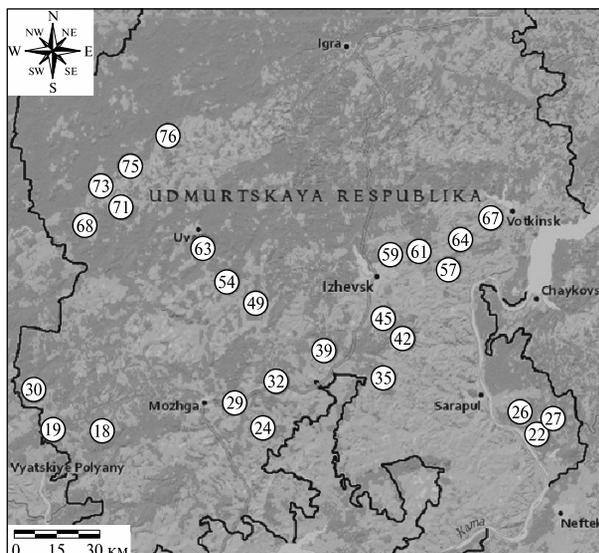


Рис. 1. Карта пробоотбора
Fig. 1. Sampling map

Пробоотбор проводили осенью 2016 г. в лесных экосистемах на территории девяти лесничеств — Селтинского, Сюмсинского, Увинского, Воткинского, Завьяловского, Яганского, Можгинского, Кизнерского и Камбарского в соответствии с общепринятой международной методикой [24] (рис. 1).

Для определения элементного состава атмосферных выпадений отбирали зеленые и зелено-коричневые сегменты мхов, соответствующие трехлетнему приросту. Мох тщательно очищали от постороннего мусора и остатков почвы. Затем высушивали в течение 48 ч при температуре 30...40 °С и прессовали без измельчения. Образцы массой 0,3 г упаковывали в полиэтилен для определения короткоживущих изотопов и в алюминиевую фольгу для определения долгоживущих изотопов [8].

Анализ. Инструментальный нейтронный активационный анализ (ИНАА) проводили на реакторе ИБР-2 лаборатории нейтронной физики (ЛНФ) ОИЯИ с использованием пневмотранспортной установки РЕГАТА [25].

Для определения короткоживущих изотопов элементов Al, Cl, Ca, Ti, V, Mn образцы облучали в течение 3...5 мин в канале реактора с плотностью потока нейтронов $1,3 \cdot 10^{12}$ нейтрон/(см²·с). Наведенную гамма-активность облученных проб измеряли дважды: в течение 3...5 мин после 5...7 мин выдержки и 10...15 мин после 20 мин выдержки [8].

Для определения долгоживущих изотопов элементов Na, K, Sc, Cr, Fe, Co, Ni, Zn, As, Se, Br, Rb, Sr, Mo, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Sm, Tb, Hf, Ta, W, Au, Th, U образцы облучали около 4 сут в канале реактора с кадмиевым экраном и плотностью потока

Т а б л и ц а 1
Содержание элементов в образцах мха, мг/кг
Content of elements in moss samples, mg/kg

Элемент	Средняя концентрация	Min	Max	Фон
Na	529	129	2590	145
Mg	287	122	529	142
Al	2485	562	8830	709
Cl	401	125	2770	138
K	14742	8530	31300	9503
Ca	5110	1890	17900	2380
Sc	0,606	0,136	1,44	0,157
Ti	170,9	63,7	581	79,4
V	5,2	1,5	14	1,7
Cr	11,46	2,49	35,8	3,17
Mn	363	179	1260	185
Ni	6,1	1,62	23,6	2,1
Co	0,84	0,273	2,45	0,31
Fe	1585	418	5250	437
Zn	45,5	21,5	85,3	26,3
As	0,67	0,191	1,46	0,29
Se	0,24	0,15	0,365	0,16
Br	5,59	3,11	12,5	3,26
Sr	41,2	16,1	71,6	16,3
Rb	7,5	3,52	13,8	3,7
Sb	0,16	0,06	0,39	0,063
I	1,085	0,418	2,12	0,546
Ba	98	18,7	211	37
Cs	0,14	0,06	0,37	0,07
La	1,3	0,3	4,21	0,4
Ce	2,81	0,54	9,35	0,57
Sm	0,21	0,04	0,65	0,055
Tb	0,031	0,006	0,1	0,007
Dy	0,91	0,68	1,46	0,71
Yb	0,12	0,02	0,44	0,029
Tm	0,022	0,006	0,06	0,007
Hf	0,28	0,05	1,3	0,07
Ta	0,041	0,008	0,13	0,009
W	0,52	0,04	4,11	0,07
Au	0,002	0,0004	0,0071	0,001
Th	0,26	0,06	0,72	0,08
U	0,13	0,03	0,36	0,041

резонансных нейтронов $1,6 \cdot 10^{12}$ нейтрон/(см²·с). После облучения образцы для измерения переупаковывали в чистые контейнеры. Наведенную гамма-активность образцов измеряли дважды: спустя 4–5 дней после выгрузки из канала облучения в течение 45 мин и спустя 20 дней в течение 2,5–3 ч. Для обработки гамма-спектров и расчета концентраций элементов использовали пакет программ, разработанных в ЛНФ ОИЯИ. Погрешности определения концентраций для большинства элементов были в пределах 10–15 %, а при определении концентраций элементов на уровне чувствительности метода — 30 % и более (Co, Ni, Ba, Ta, W, Hg) [8].

Контроль качества. Качество анализа обеспечивалось с помощью сертифицированных эталонных материалов IAEA-Lichens-336 (лишайник, МАГАТЭ), NIST-Coal-1632b, NIST-Soil-2709, навески которых облучали в одинаковых условиях с исследуемыми образцами [8].

ГИС-технологии. Для наглядного представления аналитических данных и выявления источников пространственного распределения элементов использовали технологии географической информационной системы (ГИС) — пакет программ ArcGIS 13.1 для построения карт распределений изучаемых элементов.

Факторный анализ. Для выявления возможных источников происхождения элементов во мхах при обработке результатов НАА использовали метод многомерного статистического анализа — факторный анализ. Идея использования многомерного статистического анализа в работах, связанных с оценкой состояния окружающей среды, состоит в том, что корреляционные связи между множеством элементов, содержащихся во мхах, определяются существованием меньшего числа независимых факторов, в данном случае — источников загрязнения, которые характеризуются конкретным набором элементов [1]. Значения факторных нагрузок определяли с помощью программы Statistica 5.5.

Результаты и обсуждение

Результаты определения концентраций 37 элементов во мхах методом НАА представлены в табл. 1. Фоновую концентрацию определяли путем нахождения трех минимальных значений и нахождения среднего с использованием методов описательной статистики.

Как видно из полученных результатов, на исследуемой территории наблюдается следующая тенденция накопления элементов: Al > Fe > Ti > Zn > Sr > Cr > Rb > Ni > V > Ce > I > Co > As > W > Th > Se > Sb > Cs > U.

В целом в атмосферном воздухе по всей территории содержание большинства элементов по сравнению с фоновым повышенное, что, очевидно, связано с воздействием выбросов промышленных предприятий г. Ижевска.

Для выявления возможных источников загрязнения был применен факторный анализ. С помощью программы Statistica 5.5 было выделено четыре интегрирующих фактора (табл. 2). Применение факторного анализа позволяет выявлять и проводить сравнение уровней загрязнения.

Фактор 1 — «почвенный компонент» — Cr, Ni, Co, Fe, As, Sb, Cs, Th, U — отражает поступление элементов как в процессе выветривания поверхностного слоя земной коры и обработанных

Таблица 2

Результаты факторного анализа

Factor analysis results

Элемент	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4
Na	0,27	0,91	-0,09	-0,02
Mg	0,27	0,87	0,14	0,29
Al	0,35	0,92	-0,05	-0,03
Cl	-0,05	0,04	0,08	0,95
K	-0,07	0,16	0,21	0,86
Ca	0,10	0,27	0,82	0,21
Sc	0,61	0,12	0,36	0,18
Tb	0,26	0,89	-0,19	-0,11
V	0,50	0,81	0,05	-0,06
Cr	0,77	0,47	0,33	0,04
Mn	-0,05	0,11	0,72	-0,12
Ni	0,84	0,26	0,27	-0,02
Co	0,84	0,32	0,32	-0,06
Fe	0,88	0,37	0,22	-0,04
Zn	0,08	-0,01	0,72	-0,08
As	0,72	0,21	-0,29	0,01
Se	0,25	-0,17	0,69	-0,10
Br	0,27	-0,02	0,80	0,26
Sr	0,37	0,64	0,46	0,17
Rb	0,14	-0,13	-0,25	0,74
Sb	0,70	-0,03	0,55	0,02
I	-0,60	0,45	0,14	0,01
Ba	0,06	0,62	0,54	0,08
Cs	0,91	0,32	0,09	0,03
W	0,32	-0,03	0,90	0,05
Th	0,87	0,44	0,16	0,01
U	0,83	0,39	0,32	0,02
Expl.Var	7,79	6,05	5,31	2,53
Prp.Totl	0,29	0,22	0,20	0,09

Примечание. Полу жирным шрифтом выделена высокая положительная связь фактора с элементом.

горных пород, так и в результате промышленной переработки топлива. Максимальные концентрации Fe, Cs, Th, U выявлены в биомассе мхов, собранных вблизи городов Ижевск и Камбарка.

Фактор 2 — «растительный фактор» — Na, Mg, Al, Ti, V — отражает поступление элементов, необходимых для протекания биохимических процессов и обеспечения жизнедеятельности мха.

Фактор 3 — «промышленное производство» — Ca, Mn, Zn, W, Br — отражает воздействие на атмосферный воздух промышленных выбросов. Значительные концентрации этих элементов характерны для пылевых выбросов машиностроительной и металлообрабатывающей отраслей промышленности. Атмосферные выпадения, Ca, Zn, Br и W локализованы в зоне радиусом 30...40 км вокруг Ижевска, где сосредоточены предприятия металлургии и металлообработки.

Фактор 4 — «добыча нерудных полезных ископаемых» — Cl, K, Rb — отражает воздействие на атмосферный воздух различных месторождений

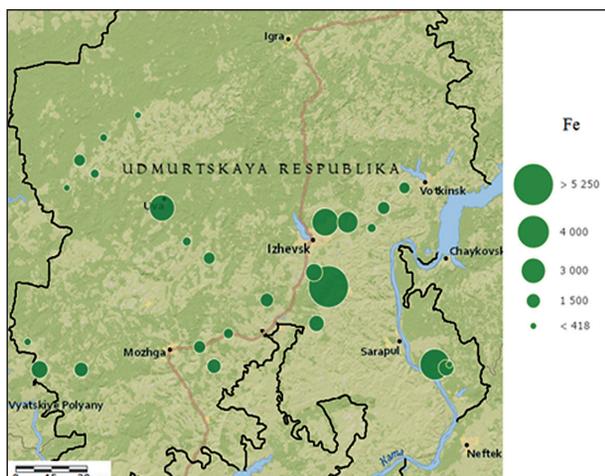


Рис. 2. Карта распределения содержания железа, относящегося к фактору 1
Fig. 2. Distribution map of the iron content related to factor 1

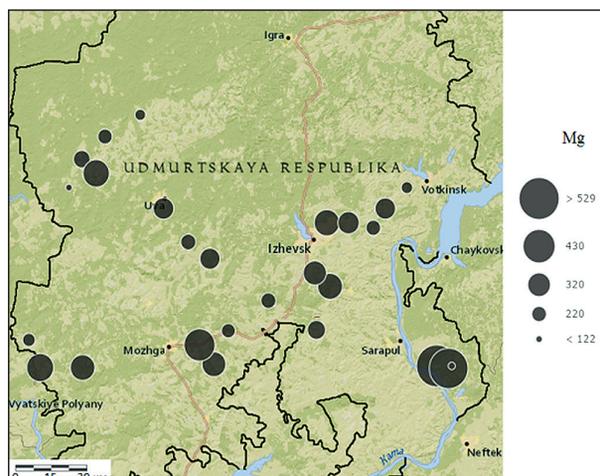


Рис. 3. Карта распределения содержания магния, относящегося к фактору 2
Fig. 3. Distribution map of magnesium content related to factor 2

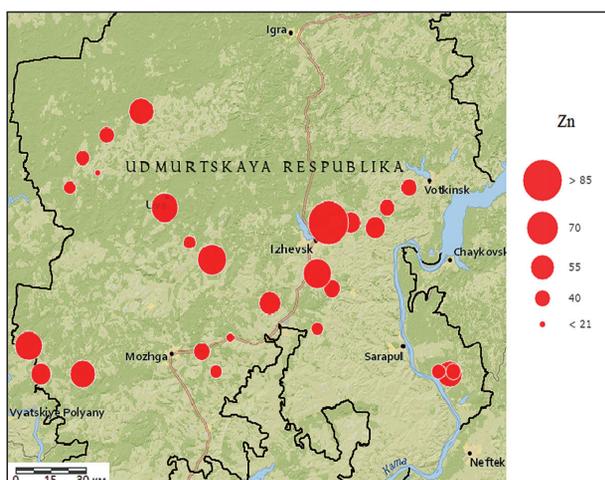


Рис. 4. Карта распределения содержания цинка, относящегося к фактору 3
Fig. 4. Distribution map of zinc content related to factor 3

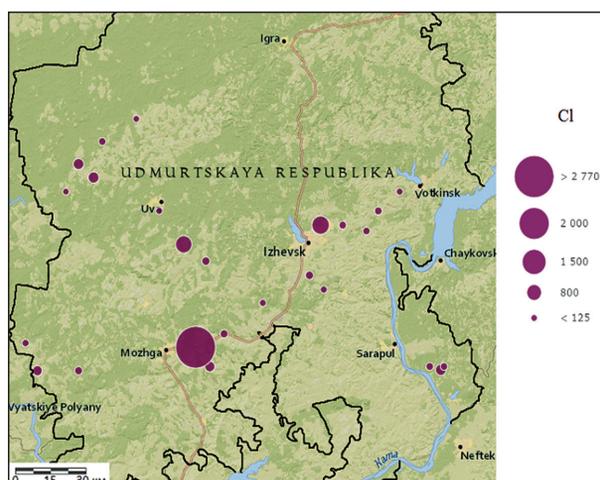


Рис. 5. Карта распределения содержания хлора, относящегося к фактору 4
Fig. 5. Distribution map of chlorine content related to factor 4

добычи нерудных полезных ископаемых (песка, известняка, глинистого сырья), а также выбросы в атмосферный воздух предприятий по производству строительных материалов.

Для визуальной интерпретации уровня загрязнений на изучаемой территории с помощью геостатистических методов (ГИС-технологий) были построены карты пространственного распределения содержания элементов, а также оценки факторов 1–4 (рис. 2–5).

Выводы

Проведенные исследования показали высокую информативность, пригодность ИНАА и метода мхов-биомониторов для исследования многоэлементного состава атмосферных выпадений на территории Удмуртской Республики. В ходе исследований было выявлено наличие очагов повышенных концентраций элементов, харак-

терных для металлургического производства и металлообработки. Концентрация 37 элементов, определенная в образцах мхов, использована для построения с помощью ГИС-технологий карт пространственного распределения элементов на исследуемой территории.

Показано, что степень загрязнения некоторыми элементами зоны, прилегающей к границам г. Ижевска, выше, чем на остальной части исследуемой территории. Именно в данной зоне отмечаются очаги повышенных концентраций элементов, характерных для металлургического производства и металлообработки.

В результате проведения факторного анализа выявлены 1–4 фактора поступления элементов в атмосферу. Основное поступление элементов обеспечивает фактор 1, отражающий естественные поверхностные процессы выветривания земных пород. Фактор 2 отражает поступление элементов,

необходимых для жизнедеятельности мха. Фактор 3 отражает вклад аэротехногенного загрязнения. Фактор 4 показывает влияние добычи нерудных полезных ископаемых на атмосферный воздух.

Полученные данные позволяют оценить экологическую ситуацию в центральной и южной частях Удмуртской Республики и могут служить основой для конкретных мероприятий по охране окружающей среды.

Список литературы

- [1] Rühling A. Atmospheric Heavy Metal Deposition in Europe – estimations based on moss analysis. Copenhagen: Nordic Council of Ministers, 1994, 9 p.
- [2] Berg T. Steinnes E. Use of mosses (*Hylocomium splendens* and *Pleurozium schreberi*) as biomonitors of heavy metal deposition: from relative to absolute deposition values // *Environmental Pollution*, 1997, v. 98, no. 1, pp. 61–71.
- [3] Rühling A., Steinnes E. Atmospheric Heavy Metal Deposition in Europe 1995.1996. Copenhagen: Nordic Council of Ministers, 1998, 15 p.
- [4] Markert B., Breure A.M., Zechmeister H.G. Bioindicators and Biomonitors, Principles, Concepts and Applications. Amsterdam, Tokyo, NY: Elsevier, 2003, 997 p.
- [5] Markert B., Fraenzle S., Fomin A. Elements and Their Compounds in the Environment. Eds. E. Merian, M. Anke, M. Ihnat, M. Stoeppler. Weinheim; Tokyo; NY: Wiley-VCH, 2004, pp. 235–254.
- [6] Wolterbeek B. Biomonitoring of trace element air pollution: principles, possibilities and perspectives // *Env. Pollution*, 2002, v. 120, pp. 11–21.
- [7] Markert B., Wünschmann S., Fraenzle S., Wappelhorst O. On the road from environmental biomonitoring to human health aspects: monitoring atmospheric heavy metal deposition by epiphytic/epigeic plants: present status and future needs // *Int. J. Environment and Pollution*, 2008, v. 32, no. 4, pp. 486–498.
- [8] Вергель К.Н., Горяйнова З.И., Вихрова И.В., Фронтасьева М.В. Метод мхов-биоиндикаторов и ГИС-технологии в оценке воздушных загрязнений промышленными предприятиями Тихвинского района Ленинградской области // *Экология урбанизированных территорий*, 2014. № 2. С. 92–101.
- [9] Смирнов Л.И., Фронтасьева М.В., Стейннес Э. Многомерный статистический анализ концентраций тяжелых металлов и радионуклидов во мхах и почве Южного Урала // *Атомная энергия*, 2004. Т. 97. Вып. 1. С. 68–74.
- [10] Ermakova E.V., Frontasyeva M.V., Pavlov S.S., Povtoreyko E.A., Steinnes E., Cheremisina Ye.N. Air pollution studies in Central Russia (Tver and Yaroslavl Regions) using the moss biomonitoring technique and neutron activation analysis // *J. of Atmospheric Chemistry*, 2004, v. 49, pp. 549–561.
- [11] Ермакова Е.В., Фронтасьева М.В., Стейннес Э. Изучение атмосферных выпадений тяжелых металлов и других элементов на территории Тульской области с помощью метода мхов-биоиндикаторов // *Экологическая химия*, 2004. Т. 13. Вып. 3. С. 167–180.
- [12] Pankratova Yu.S., Frontasyeva M.V., Berdnikov A.A., Pavlov S.S. Air pollution studies in the Republic of Udmurtia, Russian Federation, using moss biomonitoring and INAA. In Proceedings of Summer School «Nuclear Physics Methods and Accelerators in Biology and Medicine-2007» / Eds. C. Granja, C. Leroy, I. Stekl // *AIP Conference Proceedings*, v. 958. New York: American Institute of Physics, 2007, p. 236–237.
- [13] Вергель К.Н., Фронтасьева М.В., Каманина И.З., Павлов С.С. Биомониторинг атмосферных выпадений тяжелых металлов на северо-востоке Московской области с помощью метода мхов-биоиндикаторов // *Экология урбанизированных территорий*, 2009. № 3. С. 88–95.
- [14] Панкратова Ю.С., Зельниченко Н.И., Фронтасьева М.В., Павлов С.С. Атмосферные загрязнения на территории Удмуртской Республики — оценки на основе анализа мхов-биоиндикаторов // *Проблемы региональной экологии*, 2009. № 1. С. 57–63.
- [15] European Atlas: Spatial and temporal trends in heavy metal accumulation in mosses in Europe (1990–2005), UNECE ICP Vegetation. Eds. H. Harmens, D. Norris. United Kingdom: Centre for Ecology & Hydrology, University of Wales Bangor, 2008, p. 51.
- [16] География Удмуртии: природные условия и ресурсы / под ред. И.И. Рысина. Ижевск: Издательский дом «Удмуртский университет», 2009. Ч. 1. 256 с.
- [17] Габдуллин В.М., Семакина А.В. Построение карты количественных характеристик загрязнения атмосферного воздуха (на примере Удмуртской Республики) // *Экология промышленного производства*, 2011. № 2. С. 21–26.
- [18] Об утверждении Лесного плана Удмуртской Республики. URL: <https://docs.cntd.ru/document/553160573> (дата обращения 25.05.2021).
- [19] Ведерников К.Е., Бухарина И.Л., Загребин Е.А. Динамика и состояние еловых насаждений в Удмуртской Республике // *Лесохозяйственная информация*, 2020. № 3. С. 5–16.
- [20] Vedernikov K.E., Zagrebina E.A., Grigoriev R.A. The state of spruce stands in the Udmurt Republic // *J. of Agriculture and Environment*, 2020, no. 2 (14), pp. 1–8.
- [21] Бухарина И.Л., Пашкова А.С., Удалов Д.Н., Старков М.Н., Светлакова О.А., Белоусова О.А. Состояние еловых насаждений в районе южнотаежных лесов таежной зоны в Удмуртской Республике // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2021. Т. 25. № 4. С. 34–43. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-4-34-43
- [22] Константинова А.С. Содержание тяжелых металлов в талломах *Xanthoriaparietina* L. в условиях г. Ижевска // *I Никитинские чтения «Актуальные проблемы почвоведения, агрохимии и экологии в природных и антропогенных ландшафтах»: матер. Междунар. науч. конф. Пермь, 19–22 ноября 2019 г. Пермь: ИПЦ Прокрость, 2020. С. 252–255.*
- [23] Боброва А.В., Васильев А.А. Тяжелые металлы в почвах и мхах-эпифитах Ленинского района г. Ижевск // *АгроЭкоИнфо*, 2021. № 4. Статья 12.
- [24] Heavy metals in European mosses: 2010 survey monitoring manual // *International Cooperative Programme on Effects of Air Pollution on Natural Vegetation and Crops*. URL: http://icpvegetation.ceh.ac.uk/manuals/documents/UNECENE_AVUMETALSMOSSMANUAL2010POPsadartedfinal_220510_.pdf (дата обращения 10.09.2021).
- [25] Фронтасьева М.В., Павлов С.С. REGATA Experimental Setup for Air Pollution Studies // *Проблемы современной физики / под ред. А.Н. Сисакяна и В.И. Трубецкова. Дубна: Изд-во ОИЯИ, 1999. С. 152–158.*

Сведения об авторах

Журавлева Анастасия Николаевна[✉] — канд. биол. наук, доцент кафедры инженерной защиты окружающей среды, ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», zhuravleva_anastasija@mail.ru

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

Свозилек Владислав — PhD, Лаборатория информационных технологий имени М.Г. Мещерякова, Объединенный институт ядерных исследований, vladislav.svozik@vsb.cz

Фронтасьева Марина Владимировна — канд. физ.-мат. наук, доцент, советник директора Лаборатории нейтронной физики имени И.М. Франка, Объединенный институт ядерных исследований, marina@nf.jinr.ru

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

Поступила в редакцию 03.12.2021.

Одобрено после рецензирования 14.01.2022.

Принята к публикации 11.05.2022.

TRACE ELEMENTS MONITORING IN UDMURT REPUBLIC BY NEUTRON ACTIVATION ANALYSIS

A.N. Zhuravleva^{1✉}, I.L. Bukharina¹, V. Svozik², M.V. Frontasyeva³, E.A. Zagrebina¹

¹Udmurt State University, 1, Universitetskaya st., 426034, Izhevsk, Udmurt Republic, Russia

²Information Technology Laboratory, Joint Institute for Nuclear Research, 6, Joliot-Curie st., 141980, Dubna, Moscow reg., Russia

³I.M. Frank Neutron Physics Laboratory, Joint Institute for Nuclear Research, 6, Joliot-Curie st., 141980, Dubna, Moscow reg., Russia

zhuravleva_anastasija@mail.ru

The results of the assessment of the degree of atmospheric pollution in the territory of the Udmurt republic by the method of moss biomonitors in combination with instrumental neutron activation analysis are presented. Concentrations of 37 macro-, micro- and trace elements were determined in moss samples. The factors of accumulation of individual elements are calculated using background values of their concentrations. The background concentration is determined by finding three minimum values and finding the average using descriptive statistics methods. Based on the analytical results, maps of the spatial distribution of heavy metals and other toxic elements in the study area were constructed using GIS technologies. Factor analysis was used as a method of multidimensional statistical analysis to identify the main sources of pollution — large industrial facilities located on the territory of the Udmurt Republic. This study is a continuation of work for other regions of Russia using multi-element instrumental neutron activation analysis and modern GIS technologies.

Keywords: biomonitors, moss-biomonitors, atmospheric pollution, heavy metals, neutron activation analysis

Suggested citation: Zhuravleva A.N., Bukharina I.L., Svozik V., Frontasyeva M.V., Zagrebina E.A. *Monitoring sledovykh elementov na territorii Udmurtskoy Respubliki metodom neytronnogo aktivatsionnogo analiza* [Trace elements monitoring in Udmurt Republic by neutron activation analysis]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 3, pp. 54–61. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-54-61

References

- [1] Rühling A. Atmospheric Heavy Metal Deposition in Europe — estimations based on moss analysis. Copenhagen: Nordic Council of Ministers, 1994, 9 p.
- [2] Berg T., Steinnes E. Use of mosses (*Hylocomium splendens* and *Pleurozium schreberi*) as biomonitors of heavy metal deposition: from relative to absolute deposition values // *Environmental Pollution*, 1997, v. 98, no. 1, pp. 61–71.
- [3] Rühling A., Steinnes E. Atmospheric Heavy Metal Deposition in Europe 1995.1996. Copenhagen: Nordic Council of Ministers, 1998, 15 p.
- [4] Markert B., Breure A.M., Zechmeister H.G. *Bioindicators and Biomonitors, Principles, Concepts and Applications*. Amsterdam, Tokyo, NY: Elsevier, 2003, 997 p.
- [5] Markert B., Fraenzle S., Fomin A. *Elements and Their Compounds in the Environment* / Eds. E. Merian, M. Anke, M. Ihnat, M. Stoeppler. Weinheim; Tokyo; NY: Wiley-VCH, 2004, pp. 235–254.
- [6] Wolterbeek B. *Biomonitoring of trace element air pollution: principles, possibilities and perspectives*. *Env. Pollution*, 2002, v. 120, pp. 11–21.
- [7] Markert B., Wünschmann S., Fraenzle S., Wappelhorst O. On the road from environmental biomonitors to human health aspects: monitoring atmospheric heavy metal deposition by epiphytic/epigeic plants: present status and future needs. *Int. J. Environment and Pollution*, 2008, v. 32, no. 4, pp. 486–498.
- [8] Vergel' K.N., Goryaynova Z.I., Vikhrova I.V., Frontas'eva M.V. *Metod mkhov-biomonitorov i GIS-tehnologii v otsenke vozdukhnykh zagryazneniy promyshlennymi predpriyatiyami Tikhvinskogo rayona Leningradskoy oblasti* [The method of moss biomonitors and GIS technologies in the assessment of air pollution by industrial enterprises of the Tikhvin district of the Leningrad region]. *Ekologiya urbanizirovannykh territoriy* [Ecology of Urbanized Territories], 2014, no. 2, pp. 92–101.

- [9] Smirnov L.I., Frontas'eva M.V., Steynnes E. *Mnogomernyy statisticheskiy analiz kontsentratsiy tyazhelykh metallov i radionuklidov vo mkhakh i pochve Yuzhnogo Urala* [Multidimensional statistical analysis of heavy metals and radionuclides concentrations in mosses and soil of the Southern Urals]. *Atomnaya energiya* [Atomic Energy], 2004, v. 97, iss. 1, pp. 68–74.
- [10] Ermakova E.V., Frontasyeva M.V., Pavlov S.S., Povtoreyko E.A., Steynnes E., Cheremisina Ye.N. Air pollution studies in Central Russia (Tver and Yaroslavl Regions) using the moss biomonitoring technique and neutron activation analysis. *J. of Atmospheric Chemistry*, 2004, v. 49, pp. 549–561.
- [11] Ermakova E.V., Frontas'eva M.V., Steynnes E. *Izuchenie atmosferykh выпадений tyazhelykh metallov i drugikh elementov na territorii Tul'skoy oblasti s pomoshch'yu metoda mkhov-biomonitorov* [Study of atmospheric precipitation of heavy metals and other elements on the territory of the Tula region using the moss-biomonitor method]. *Ecological Chemistry*, 2004, v. 13, iss. 3, pp. 167–180.
- [12] Pankratova Yu.S., Frontasyeva M.V., Berdnikov A.A., Pavlov S.S. Air pollution studies in the Republic of Udmurtia, Russian Federation, using moss biomonitoring and INAA. In *Proceedings of Summer School «Nuclear Physics Methods and Accelerators in Biology and Medicine-2007»* / Eds. C. Granja, C. Leroy, I. Stekl. AIP Conference Proceedings, v. 958. New York: American Institute of Physics, 2007, p. 236–237.
- [13] Vergel' K.N., Frontas'eva M.V., Kamanina I.Z., Pavlov S.S. *Biomonitoring atmosferykh выпадений tyazhelykh metallov na severo-vostoke Moskovskoy oblasti s pomoshch'yu metoda mkhov-biomonitorov* [Biomonitoring of atmospheric precipitation of heavy metals in the north-east of the Moscow region using the moss-biomonitor method]. *Ekologiya urbanizirovannykh territoriy* [Ecology of urbanized territories], 2009, no. 3, pp. 88–95.
- [14] Pankratova Yu.S., Zel'nichenko N.I., Frontas'eva M.V., Pavlov S.S. *Atmosfernye zagryazneniya na territorii Udmurtskoy Respubliki — otsenki na osnove analiza mkhov-biomonitorov* [Atmospheric pollution on the territory of the Udmurt Republic — estimates based on the analysis of moss biomonitors]. *Problemy regional'noy ekologii* [Problems of regional ecology], 2009, no. 1, pp. 57–63.
- [15] European Atlas: Spartial and temporal trends in heavy metal accumulation in mosses in Europe (1990-2005), UNECE ICP Vegetation/ Eds. H. Harmens, D. Norris. United Kingdom: Centre for Ecology & Hydrology; University of Wales Bangor, 2008, p. 51.
- [16] Geografiya Udmurtii: prirodnye usloviya i resursy [Geography of Udmurtia: natural conditions and resources]. Ed. I.I. Rysin. Izhevsk: Publ. House Udmurt University, 2009, part 1, 256 p.
- [17] Gabdullin V.M., Semakina A.V. *Postroenie karty kolichestvennykh kharakteristik zagryazneniya atmosfernogo vozdukh (na primere Udmurtskoy Respubliki)* [Construction of a map of quantitative characteristics of atmospheric air pollution (on the example of the Udmurt Republic)]. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva* [Ecology of Industrial Production], 2011, no. 2, pp. 21–26.
- [18] *Ob utverzhdenii Lesnogo plana Udmurtskoy Respubliki* [The Approval of the Forest Plan of the Udmurt Republic]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/553160573> (accessed 25.05.2021).
- [19] Vedernikov K.E., Bukharina I.L., Zagrebin E.A. *Dinamika i sostoyanie elovykh nasazhdeniy v Udmurtskoy Respublike* [Dynamics and condition of spruce plantations in the Udmurt Republic]. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information], 2020, no. 3, pp. 5–16.
- [20] Vedernikov K.E., Zagrebin E.A., Grigoriev R.A. The state of spruce stands in the Udmurt Republic. *J. of Agriculture and Environment*, 2020, no. 2 (14), pp. 1–8.
- [21] Bukharina I.L., Pashkova A.S., Udalov D.N., Starkov M.N., Svetlakova O.A., Belousova O.A. *Sostoyanie elovykh nasazhdeniy v rayone yuzhnotaehnykh lesov taezhnoy zony v Udmurtskoy Respublike* [State of spruce stands in Southern Taiga forests in Udmurt Republic Taiga Zone]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 4, pp. 34–43. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-4-34-43
- [22] Konstantinova A.S. *Soderzhanie tyazhelykh metallov v tallomakh Xanthoriaparietina L. v usloviyakh g. Izhevsk* [The content of heavy metals in the thalloms of Xanthoriaparietina L. in the conditions of Izhevsk]. I Nikitinskiye chteniya «Aktual'nye problemy pochvedeniya, agrokhimii i ekologii v prirodnykh i antropogennykh landshaftakh»: mater. Mezhdunar. nauch. konf. [I Nikitinsky readings «Actual problems of soil science, agrochemistry and ecology in natural and anthropogenic landscapes». Mater. International scientific conference]. Perm', 19–22 November 2019. Perm': IPTs Prokrost, 2020, pp. 252–255.
- [23] Bobrova A.V., Vasil'ev A.A. *Tyazhelye metally v pochvakh i mkhakh-epifitakh Leninskogo rayona g. Izhevsk* [Heavy metals in soils and moss-epiphytes of the Leninsky district of Izhevsk]. *AgroEcoInfo*, 2021, no. 4, article 12.
- [24] Heavy metals in European mosses: 2010 survey monitoring manual. International Cooperative Programme on Effects of Air Pollution on Natural Vegetation and Crops. Available at: http://icpvegetation.ceh.ac.uk/manuals/documents/UNECEHEAVYMETALSMOSSMANUAL2010POPSadaptedfinal_220510_.pdf (accessed 10.09.2021).
- [25] Frontasyeva M.V., Pavlov S.S., REGATA Experimental Setup for Air Pollution Studies. *Problems of modern physics*. Eds. A.N. Sisakian, V.I. Trubetskov. Dubna: JINR, 1999, pp. 152–158.

Authors' information

Zhuravleva Anastasia Nikolaevna — Cand. Sci. (Biology), Associate Professor of the Department of Environmental Engineering, Udmurt State University, zhuravleva_anastasija@mail.ru

Bukharina Irina Leonidovna — Dr. Sci. (Biology), Professor, Head of the Department of Environmental Engineering, Udmurt State University, buharin@udmlink.ru

Svozik Vladislav — PhD, Meshcheryakov Information Technology Laboratory, Joint Institute for Nuclear Research, vladislav.svozik@vsb.cz

Frontas'eva Marina Vladimirovna — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Advisor to the Director of the I.M. Frank Neutron Physics Laboratory, Joint Institute for Nuclear Research, marina@nf.jinr.ru

Zagrebin Egor Aleksandrovich — Assistant of the Department of Environmental Engineering, Udmurt State University, i.am.yeti@yandex.ru

Received 03.12.2021.

Approved after review 14.01.2022.

Accepted for publication 11.05.2022.

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

ИЗМЕНЕНИЯ ВОЗРАСТНОГО И ПОРОДНОГО СОСТАВА ОРЕХОВО-ЗУЕВСКОГО ЛЕСНИЧЕСТВА ПОСЛЕ ПОЖАРОВ И ВСПЫШКИ МАССОВОГО РАЗМНОЖЕНИЯ КОРОЕДА-ТИПОГРАФА 2010–2015 ГГ.

В.П. Захаров¹, С.А. Коротков^{2, 3✉}, Д. Дубей²

¹ГКУ МО «Мособллес», Московская обл., Одинцовский р-н, с/п Барвихинское, д. Раздоры, 1-й км Рублево-Успенского шоссе, д. 1, корп. А

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

³ФГБУН «Институт лесоведения РАН» (ИЛАН РАН), 143030, Московская обл., Одинцовский р-н, с. Успенское, ул. Советская, д. 21

skorotkov@mgul.ac.ru

Рассмотрены изменения в породно-возрастном составе лесного фонда Орехово-Зуевского лесничества Московской обл., произошедшие после катастрофических пожаров 2010 г. и последующей вспышки численности короеда-типографа. Проведены анализ таксационных описаний ревизионных периодов 2002 и 2020 гг. и сравнение таких таксационных показателей, как площади, занимаемые насаждениями основных лесобразующих пород и насаждениями различных классов возраста. Проанализированы изменения таксационных показателей для Губинского участкового лесничества, сильно пострадавшего от пожаров 2010 года. Определено влияние катастрофических изменений на структуру лесов. Установлено, что в границах лесничества произошло значительное увеличение площадей молодняков, формирующихся на участках погибших насаждений. Отмечено резкое увеличение площадей, занятых березняками первых классов возраста, несмотря на значительные объемы создания лесных культур хвойных пород. Выявлено увеличение доли березовых насаждений старших возрастов, находящихся на грани распада основного полога. Сформулированы основные направления ведения лесного хозяйства на ближайшие годы, в том числе качественное проведение мероприятий по уходу за лесами, формирование устойчивых насаждений из мелколиственных молодняков и обеспечение охраны от пожаров лесных культур, примыкающих к дорогам общего пользования и земельным участкам сельскохозяйственного назначения или населенных пунктов, занятых травянистой растительностью. Особое внимание уделено естественным процессам развития лесных экосистем, в том числе возобновлению хвойных и широколиственных пород и смене насаждений мелколиственных пород елью. Выработаны подходы к управлению лесами с учетом преобладания их средообразующих и рекреационных функций.

Ключевые слова: Орехово-Зуевское лесничество, смена пород, динамика лесов, структура леса, возобновление леса

Ссылка для цитирования: Захаров В.П., Коротков С.А., Дубей Д. Изменения возрастного и породного состава Орехово-Зуевского лесничества после пожаров и вспышки массового размножения короеда-типографа 2010–2015 гг. // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 3. С. 62–68.
DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-62-68

Леса Московской обл. подвергаются интенсивному хозяйственному воздействию, которое приводит не только к сокращению их площади за счет жилищного, промышленного строительства и развития транспортной инфраструктуры, но и изменяет породно-возрастной состав насаждений.

Естественные коренные леса исчезли на территории региона несколько столетий тому назад вследствие рубок, выпаса скота, распашки с последующим зарастанием или созданием лесных культур. В связи с этим в настоящее время можно говорить о множестве вариантов демулационных сукцессий [1–5]. Лесовосстановительный процесс, идущий в соответствии с экологическими свойствами древесных пород и почвенно-грунтовыми условиями, во многом определяется характером антропогенного воздействия, а также

степенью нарушенности исходных вариантов лесных экосистем [6, 7].

Цель работы

Цель работы — оценка произошедших в последние десятилетия изменений в лесах Московской обл. на примере Орехово-Зуевского лесничества, расположенного в восточной части региона в пределах Мещерской низменности, а также обсуждение связанных с ними перспектив ведения лесного хозяйства.

Материалы и методы

Для такой динамичной системы, которой являются леса, характерно явление смены пород. Основными направлениями этих смен в Подмосковье являются смена сосны елью, а также смена мелколиственных насаждений из березы и осины елью. На отдельных участках зафиксировано

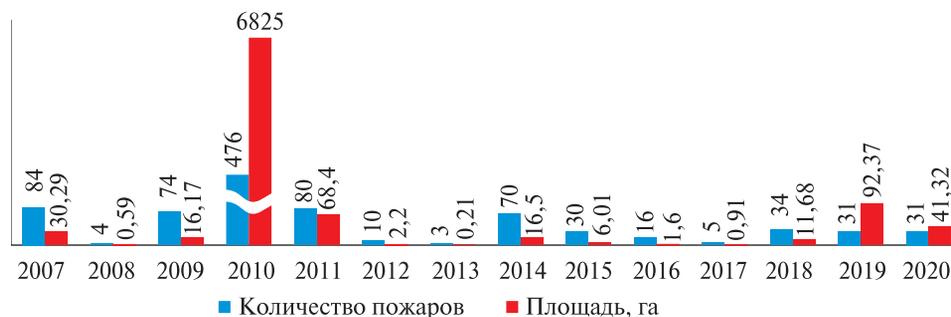


Рис. 1. Количество и площадь лесных пожаров на территории Орехово-Зуевского лесничества по годам

Fig. 1. Number and area of forest fires in the territory Orekhovo-Zuevsky forestry by year

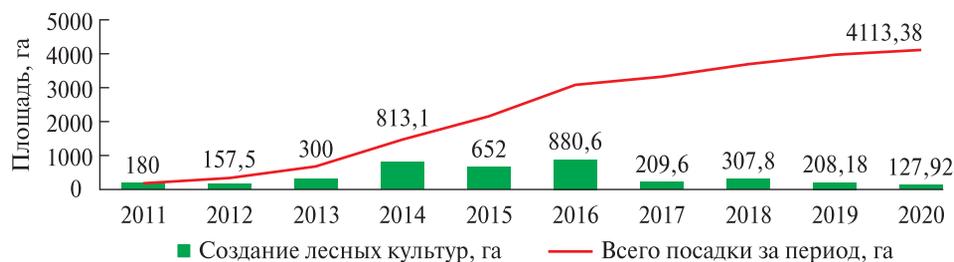


Рис. 2. Объем искусственного лесовосстановления на территории Орехово-Зуевского лесничества по годам

Fig. 2. The volume of forest regeneration in the territory Orekhovo-Zuevsky forest division by year

увеличение доли липы мелколистной [8–10] и дуба черешчатого [11, 12]. Спелые и перестойные насаждения на протяжении некоторых периодов, возможно, длительных, будут сохранять устойчивость. Однако ельники и березняки по достижении ими возраста естественной спелости могут распасться в течение нескольких лет даже при стабильных условиях среды [13, 14]. В случае возникновения аномальных явлений, например, метеорологических, происходит их немедленный распад [15–17].

Одной из наиболее значимых природных аномалий последнего времени стали катастрофические лесные пожары, в частности 2010 г., и спровоцированная засухой вспышка массового размножения короеда-типографа. Данные явления стали очередной точкой отсчета в лесном хозяйстве Подмосковья, заняв место в ряду таких аномальных сезонов, как 1920, 1938, 1972 г. В Московской обл. летом 2010 г. температура воздуха 26 дней была выше 30 °С, температура почвы в течение 42 дней достигала 45–55 °С [18]. Для Орехово-Зуевского лесничества, расположенного на востоке региона, следствием этого стало значительное распространение лесных и лесоторфяных пожаров (рис. 1).

Повреждения насаждений продолжилось за счет развития вспышки массового размножения короеда-типографа, находящейся в фазе максимальной численности в 2011–2012 гг. [19], вплоть до ее затухания в 2014 г. [20]. Одновременно

начались хозяйственные процессы, связанные с ликвидацией последствий катастроф, выразившиеся в расчистке погибших насаждений и воспроизводстве лесов, в том числе путем создания лесных культур (рис. 2). Ожидается, что в ближайшие десятилетия будет наблюдаться аналогичная динамика объемов рубок ухода в молодняках и далее рост потребности в последующих рубках ухода.

Изменения состояния лесного фонда проанализированы на основе данных лесной таксации, проведенной на территории лесничества в 2002 и 2020 гг. В ходе анализа было сделано сравнение таксационных показателей по 13 участковым лесничествам Орехово-Зуевского лесничества.

Несмотря на то, что лесоустроительные материалы не всегда полно отражают состояние конкретных лесных участков и происходящие в них процессы развития лесных фитоценозов, даже их формальный анализ может продемонстрировать основные тенденции смены состава древостоев.

Результаты и обсуждение

Вследствие пожаров и массовых повреждений насаждений короедом-типографом произошли значительные изменения в их породной и возрастной структуре, в частности, в пределах Орехово-Зуевского лесничества, что подтверждает указанный выше анализ лесоустроительных материалов.

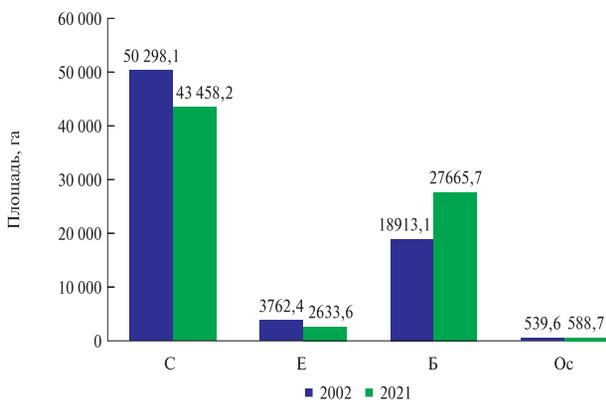


Рис. 3. Площади насаждений основных преобладающих пород по годам лесоустройства, га

Fig. 3. Areas of the main dominant species by years of forest inventory, ha

Как видно из диаграммы (рис. 3), значительно увеличилась доля насаждений с преобладанием березы, что можно объяснить процессами смены пород на участках естественного восстановления после сплошных санитарных рубок и гарей. Выбытие площадей хвойных пород частично компенсируется созданием хвойных лесных культур, для ели — выходом этой породы в верхний ярус в мягколиственных насаждениях.

Для всех основных лесообразующих пород были проанализированы изменения по классам возраста по данным учетов 2002 и 2020 гг, и в большинстве случаев (за исключением черноольховых и дубовых насаждений, занимающих небольшой процент общей лесопокрытой площади лесничества) они связаны с увеличением доли молодняков (рис. 4–6).

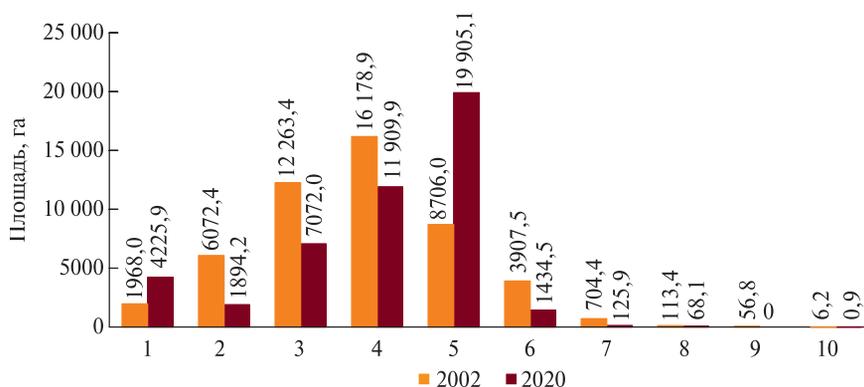


Рис. 4. Распределение площади сосновых насаждений по классам возраста по годам лесоустройства, га

Fig. 4. Distribution of the area of pine plantations (ha) by age classes by years of forest management

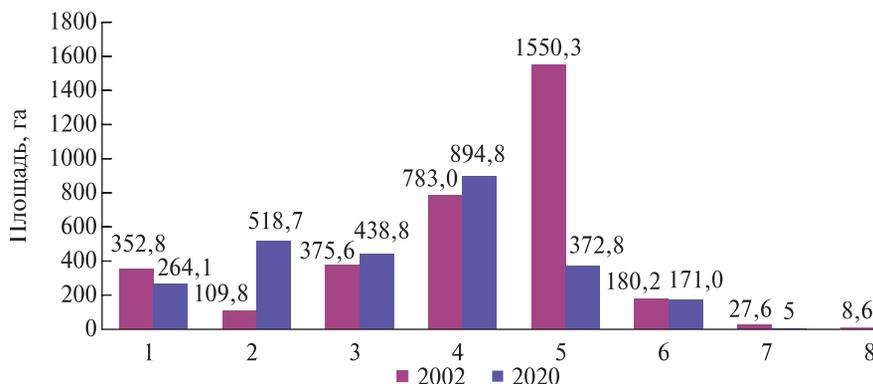


Рис. 5. Распределение площади еловых насаждений по классам возраста по годам лесоустройства, га

Fig. 5. Area of spruce stands by age classes by years of forest inventory, ha

Приведенные данные наглядно иллюстрируют значительное увеличение площадей молодняков, формирующихся на участках погибших насаждений (включая площади, оставленные на естественное зарастивание, лесосеки, где были проведены мероприятия по содействию естественному возобновлению, а также отдельные участки,

где по различным причинам попытки создания лесных культур оказались unsuccessful).

При этом сохраняется большая доля перестойных насаждений с преобладанием березы, перешедших из 6–7 в 8–9 классы возраста, что дает основания предполагать развитие процессов распада листовенного полога.

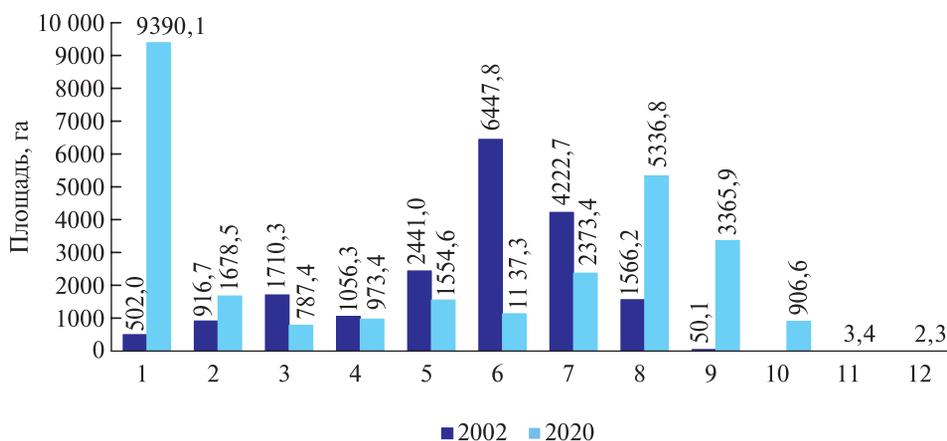


Рис. 6. Распределение площади березовых насаждений по классам возраста по годам лесоустройства, га

Fig. 6. Area of birch stands by age classes by years of forest inventory, ha

Данные по площадям насаждений с преобладанием ели демонстрируют серьезные (около 80 %) потери насаждений 5 класса возраста, которые были поражены короедом-типографом.

Для отдельных участков лесничеств влияние катастрофических явлений на возрастную структуру насаждений еще более выражено. Так, в пределах Губинского участкового лесничества, по территории которого в 2010 г. прошел крупный лесной пожар и в 2012–2014 гг. были зафиксированы очаги короеда-типографа, резко увеличилась доля площадей, занятых насаждениями 1 класса возраста, расположенных на участках сплошной расчистки горельников, с последующим созданием на них лесных культур сосны (рис. 7) или естественного лесовосстановления.

Наличие площадей с избыточным увлажнением определило большую долю участков,

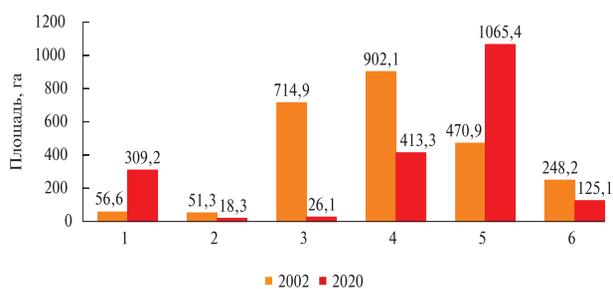


Рис. 7. Распределение площади сосновых насаждений по классам возраста по годам лесоустройства в пределах Губинского участкового лесничества, га

Fig. 7. Area of pine stands of Gubinsky district forestry by age classes by years of forest inventory, ha

на которых применялось естественное лесовосстановление. Именно они представлены в настоящее время мягколиственными насаждениями на местах сплошных санитарных рубок (рис. 8).

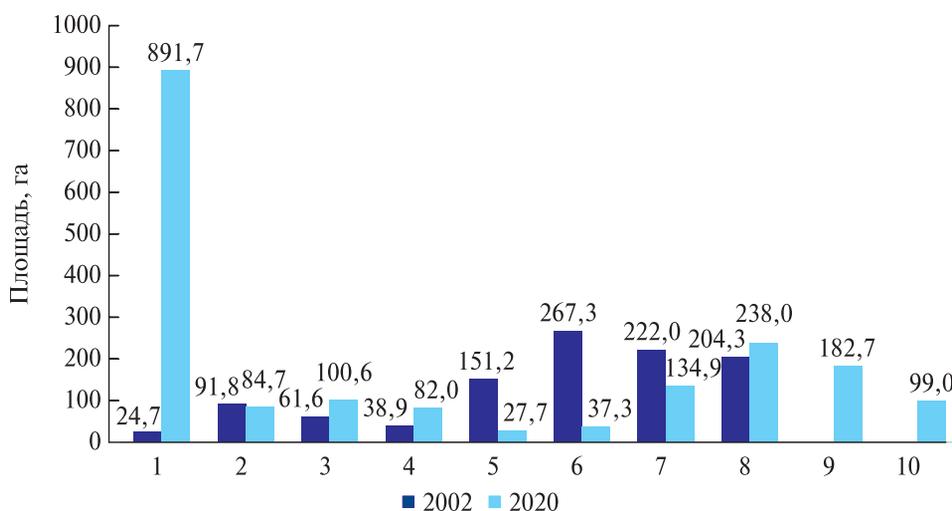


Рис. 8. Распределение площади березовых насаждений (га) по классам возраста по годам лесоустройства в пределах Губинского участкового лесничества

Fig. 8. Area of birch stands of Gubinsky district forestry by age classes by years of forest inventory, ha

Выводы

На примере Орехово-Зуевского лесничества показано, что катастрофические явления, с которыми столкнулось лесное хозяйство столичного региона, повлекли за собой серьезные изменения в породной и возрастной структуре лесного фонда. Это обусловило необходимость перестройки хозяйственных мероприятий, в том числе с привлечением дополнительных бюджетных средств. Вследствие продолжительности процесса лесовосстановления, последствия этого будут влиять на лесохозяйственную деятельность на протяжении нескольких десятилетий.

Среди важных направлений лесохозяйственных мероприятий, актуальных на ближайшие годы, можно отметить следующие:

- качественное проведение лесоводственных уходов и рубок ухода в молодняках для создания благоприятных условий развития хвойных пород и регулирования состава древостоев формируемых насаждений;

- при планировании мероприятий по воспроизводству лесов необходим учет доли широколиственных пород (в первую очередь, дуба и липы) в составе естественного возобновления;

- выявление среди мягколиственных молодняков насаждений, в которых посредством рубок ухода можно сформировать продуктивные, устойчивые и отвечающие целевому назначению насаждения;

- обеспечение охраны от пожаров участков хвойных культур, в первую очередь примыкающих к автомобильным и железным дорогам, а также граничащих с земельными участками различных категорий, занятыми травянистой растительностью;

- анализ состояния перестойных насаждений мягколиственных пород в целях снижения негативных последствий одновременного распада верхнего полога и повышения устойчивости насаждений за счет второго яруса и подроста предварительного естественного возобновления.

Во избежание резких изменений в лесном фонде Московской обл. необходимо выработать подходы к управлению лесами с учетом преобладания их средообразующих и рекреационных функций посредством формирования устойчивых насаждений.

Список литературы

[1] Абатуров А.В., Казанцева Т.Н. Современная динамика и древняя история лесов Подмоскovie // Бюл. Моск. об-ва испытателей природы. Отдел биологический, 2003. Т. 108. № 2. С. 25–31.

[2] Коротков С.А., Стоноженко Л.В., Киселева В.В., Глазнов Ю.Б. Влияние экологических и социально-экономических факторов на формирование лесов Подмоскovie // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, 2020. Т. 31. № 1–2. С. 90–115.

[3] Лукина Н.В. Аккумуляция углерода в лесных почвах и сукцессионный статус лесов. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2018. 232 с.

[4] Орлова М.А. Мозаичность лесных биогеоценозов и продуктивность почв // Лесоведение, 2011. № 6. С. 39–48.

[5] Турубанова С.А. Экологический сценарий истории формирования живого покрова Европейской России и сопредельных территорий на основе реконструкции ареалов ключевых видов животных и растений: автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2002. 23 с.

[6] Коломыц Э.Г. Итоги и перспективы геосистемного мониторинга в Приокско-Террасном биосферном заповеднике // Изв. РАН. Сер. географическая, 2019. № 3. С. 41–56.

[7] Рысин Л.П. Сукцессионные процессы в лесах центральной части Русской равнины // Успехи современной биологии, 2009. Т. 129. № 6. С. 578–587.

[8] Каплевский А.А., Уланова Н.Г. Мониторинг структуры и динамики подроста и подлеска ельника после гибели древостоя в очаге поражения короедом-типографом // Сохранение лесных экосистем: проблемы и пути их решения, 2017. С. 56–61.

[9] Коротков С.А., Киселева В.В., Стоноженко Л.В. О направлениях лесообразовательного процесса в Северо-Восточном Подмоскovie // Лесотехнический журнал, 2015. Т. 5. № 3(19). С. 41–54. DOI 10.12737/14152

[10] Черненко Т.В. Современная организация лесных сообществ с участием широколиственных пород в зоне широколиственно-хвойных лесов (на примере Московской области) // Растительность России, 2018. № 33. С. 107–130.

[11] Дубенок Н.Н., Кузьмичев В.В., Лебедев А.В. Динамика лесного фонда Лесной опытной дачи РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева за 150 лет // Изв. Тимирязевской сельскохозяйственной академии, 2018. № 4. С. 5–19.

[12] Коротков С.А., Захаров В.П. Особенности естественного возобновления дуба на территории Орехово-Зуевского лесничества Московской области // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2019. Т. 23. № 5. С. 22–29. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-5-22-29

[13] Bragg D.C., Roberts D.W., Crow T.R. A hierarchical approach for simulating northern forest dynamics // Ecological Modelling, 2004, t. 173, no. 1, pp. 31–94.

[14] Gromtsev A. Natural disturbance dynamics in the boreal forests of European Russia: a review // Silva fennica, 2002, t. 36, no. 1, pp. 41–55.

[15] Данченко А.М., Данченко М.А., Мясников А.Г. Современное состояние городских лесов и их использование // Вестник Томского государственного университета. Биология, 2010. № 4 (12). С. 90–104.

[16] Неволин О.А., Грицынин А.Н., Торхов С.В. О распаде и гибели высоковозрастных ельников в Березниковском лесхозе Архангельской области // ИВУЗ Лесной журнал, 2005. № 6. С. 7–22.

[17] Стоноженко Л.В., Коротков С.А., Киселева В.В. Тенденции естественного возобновления в хвойно-широколиственных лесах (на примере Щелковского учебно-опытного лесхоза, национальных парков «Лосиный остров» и «Угра») // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика, 2017. Т. 5. № 1(27). С. 116–119.

[18] Логинов В.Ф. О возможной причине жаркого лета 2010 г. // Природопользование, 2010. № 18. С. 5–8.

[19] Малахова Е.Г. Совершенствование лесоводственных мероприятий и государственного лесопатологического мониторинга в еловых лесах Московской области // автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М., 2015.

[20] Гниненко Ю.И., Хегай И.В. Динамика усыхания еловых лесов в Московском регионе // Лесохозяйственная информация, 2018. № 2. С. 65–74.

Сведения об авторах

Захаров Владимир Петрович — вед. инженер ГКУ МО «Мособллес», zakharov@forest.ru

Коротков Сергей Александрович — канд. биол. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), skorotkov@mgul.ac.ru

Дубей Дейв — студент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал)

Поступила в редакцию 16.12.2021.

Одобрено после рецензирования 24.02.2022.

Принята к публикации 27.04.2022.

AGE AND SPECIES COMPOSITION CHANGES IN OREKHOVO-ZUEVSKOE FOREST DIVISION AFTER FIRES AND ENGRAVER BEETLE MASS REPRODUCTION IN 2010–2015

V.P. Zakharov¹, S.A. Korotkov^{2, 3✉}, D. Dubey²

¹The State Governmental Institution of the Moscow reg. «Mosobles», 1, build. A, 1st km of Rublevo-Uspenskoe highway, Razdory village, Barvikhinskoe village, Odintsovo district, Moscow reg., Russia

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

³Institute of Forest Science Russian Academy of Sciences, 21, Sovetskaya st., 140030, Uspenskoe, Moscow reg., Russia

skorotkov@mgul.ac.ru

The changes in the species and age composition of the forest fund of the Orekhovo-Zuevsky forest division of the Moscow region, which occurred after the disastrous fires of 2010 and the subsequent outbreak of the engraver bark beetle, are considered in the article. The analysis of the forest inventory of the revision periods of 2002 and 2020 was carried out and the comparison of the following forest inventory indicators was made: the areas occupied by plantations of the main forest-forming species, the areas occupied by plantations of various age classes. Separately, the changes in forest inventory indicators for the severely affected Gubinsky district forestry were analyzed. The impact of catastrophic changes on the structure of forests is identified as an important task for further study. It has been established that there has been a significant increase of young trees growth in the areas of dead plantations within the boundaries of the forestry. Despite the significant volumes of the creation of coniferous forest plantings, there was a sharp increase in the areas occupied by birch trees of the first age classes. In addition, there was an increase in the proportion of birch plantations of older ages, which are on the verge of disintegration of the main canopy. The main directions of forestry management for the coming years are formulated, including high-quality forest care measures, the formation of sustainable plantations of small-leaved young trees and ensuring protection from fires of forest crops adjacent to public roads and agricultural land plots or settlements occupied by herbaceous vegetation. Special attention should be paid to the natural processes of development of forest ecosystems, including the renewal of coniferous and broad-leaved species and the succession of stands of small-leaved species by spruce. Proposals are made regarding approaches to forest management, taking into account the predominance of their environmental and recreational functions.

Keywords: Orekhovo-Zuevskoe forest division, species change, forest dynamics, forest structure, reforestation

Suggested citation: Zakharov V.P., Korotkov S.A., Dubey D. *Izmeneniya vozrastnogo i porodnogo sostava Orekhovo-Zuevskogo lesnichestva posle pozharov i vspyshki massovogo razmnozheniya koroeda-tipografa 2010–2015 gg.* [Age and species composition changes in Orekhovo-Zuevskoe forest division after fires and engraver beetle mass reproduction in 2010–2015]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 3, pp. 62–68. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-62-68

References

- [1] Abaturov A.V., Kazantseva T.N. *Sovremennaya dinamika i drevnyaya istoriya lesov Podmoskov'ya* [Modern dynamics and ancient history of forests near Moscow]. *Byull. Moskovskogo obshchestva ispytateley prirody. Otdel biologicheskii* [Bull. Moscow Society of Naturalists. Biological department], 2003, v. 108, no. 2, pp. 25–31.
- [2] Korotkov S.A., Stonozhenko L.V., Kiseleva V.V., Glazunov Yu.B. *Vliyaniye ekologicheskikh i sotsial'no-ekonomicheskikh faktorov na formirovaniye lesov Podmoskov'ya* [The influence of environmental and socio-economic factors on the formation of forests near Moscow]. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem* [Problems of environmental monitoring and modeling of ecosystems], 2020, v. 31, no. 1–2, pp. 90–115.
- [3] Lukina N.V. *Akkumulyatsiya ugleroda v lesnykh pochvakh i suktsessionnyy status lesov* [Carbon accumulation in forest soils and successional status of forests]. Moscow: *Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK* [Association of scientific publications KMK], 2018, 232 p.
- [4] Orlova M.A. *Mozaichnost' lesnykh biogeotsenozov i produktivnost' pochv* [Mosaic of forest biogeocenoses and soil productivity]. *Lesovedenie*, 2011, no. 6, pp. 39–48.

- [5] Turubanov S.A. *Ekologicheskiiy stsenariy istorii formirovaniya zhivogo pokrova Evropeyskoy Rossii i sopredel'nykh territoriy na osnove rekonstruktsii arealov klyuchevykh vidov zhivotnykh i rasteniy* [Ecological scenario of the history of the formation of the living cover of European Russia and adjacent territories based on the reconstruction of the ranges of key animal and plant species]. Dis. Cand. Sci. (Biol.). M., 2002, 23 p.
- [6] Kolomyts E.G. *Itogi i perspektivy geosistemnogo monitoringa v Prioksko-Terrasnom biosfernom zapovednike* [Results and prospects of geosystem monitoring in the Prioksko-Terrasny Biosphere Reserve]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya geograficheskaya* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geographic Series], 2019, no. 3, pp. 41–56.
- [7] Rysin L.P. *Suksessionnyye protsessy v lesakh tsentral'noy chasti Russkoy ravniny* [Succession processes in the forests of the central part of the Russian Plain]. *Uspekhi sovremennoy biologii* [Successes of modern biology], 2009, v. 129, no. 6, pp. 578–587.
- [8] Kaplevskiy A.A., Ulanova N.G. *Monitoring struktury i dinamiki podrosta i podleska el'nika posle gibeli drevostoya v ochage porazheniya koroedom-tipografom* [Monitoring the structure and dynamics of undergrowth and undergrowth of a spruce forest after the death of a forest stand in the focus of damage by a bark beetle]. *Sokhraneniye lesnykh ekosistem: problemy i puti ikh resheniya* [Preservation of forest ecosystems: problems and ways to solve them], 2017, pp. 56–61.
- [9] Korotkov S.A., Kiseleva V.V., Stonozhenko L.V. *O napravleniyakh lesoobrazovatel'nogo protsessa v Severo-Vostochnom Podmoskov'e* [On the directions of the forest formation process in the North-Eastern Moscow Region]. *Lesotekhnicheskiiy zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2015, v. 5, no. 3 (19), pp. 41–54. DOI 10.12737/14152
- [10] Chernen'kova T.V. *Sovremennaya organizatsiya lesnykh soobshchestv s uchastiem shirokolistvennykh porod v zone shirokolistvenno-khvoynnykh lesov (na primere Moskovskoy oblasti)* [Modern organization of forest communities with the participation of broad-leaved species in the zone of broad-leaved-coniferous forests (on the example of the Moscow region)]. *Rastitel'nost' Rossii* [Vegetation of Russia], 2018, no. 33, pp. 107–130.
- [11] Dubenok N.N., Kuz'michev V.V., Lebedev A.V. *Dinamika lesnogo fonda Lesnoy opytnoy dachi RGAU–MSKha imeni K.A. Timiryazeva za 150 let* [Dynamics of the Forest Fund of the Experimental Forest Dacha of the RGAU–MSHA named after K.A. Timiryazev for 150 years]. *Izvestiya Timiryazevskoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* [Proceedings of the Timiryazev Agricultural Academy], 2018, no. 4, pp. 5–19.
- [12] Korotkov S.A., Zakharov V.P. *Osobennosti estestvennogo vozobnovleniya duba na territorii Orekhovo-zuevskogo lesnichestva Moskovskoy oblasti* [Natural regeneration peculiarities of oak in Orekhovo-Zuevo forestry, Moscow Region]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2019. T. 23. № 5. С. 22–29. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-5-22-29
- [13] Bragg D.C., Roberts D.W., Crow T.R. A hierarchical approach for simulating northern forest dynamics. *Ecological Modelling*, 2004, t. 173, no. 1, pp. 31–94.
- [14] Gromtsev A. Natural disturbance dynamics in the boreal forests of European Russia: a review. *Silva fennica*, 2002, t. 36, no. 1, pp. 41–55.
- [15] Danchenko A.M., Danchenko M.A., Myasnikov A.G. *Sovremennoe sostoyaniye gorodskikh lesov i ikh ispol'zovaniye* [The current state of urban forests and their use]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* [Bulletin of the Tomsk State University. Biology], 2010, no. 4 (12), pp. 90–104.
- [16] Nevolin O.A., Gritsynin A.N., Torkhov S.V. *O raspade i gibeli vysokovoz rastnykh el'nikov v Bereznikovskom leskhoze Arkhangel'skoy oblasti* [On the decay and death of tall spruce forests in the Berezniki forestry of the Arkhangelsk region]. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2005, no. 6, pp. 7–22.
- [17] Stonozhenko L.V., Korotkov S.A., Kiseleva V.V. *Tendentsii estestvennogo vozobnovleniya v khvoyno-shirokolistvennykh lesakh (na primere Shchelkovskogo uchebno-opytного leskhoza, natsional'nykh parkov «Losinyy ostrov» i «Ugra»)* [Trends in natural regeneration in coniferous-broad-leaved forests (on the example of the Shchelkovsky educational and experimental forestry, the Losiny Ostrov and Ugra national parks)]. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice], 2017, v. 5, no. 1(27), pp. 116–119.
- [18] Loginov V.F. *O vozmozhnoy prichine zharkogo leta 2010 g.* [On the possible cause of the hot summer of 2010]. *Prirodopol'zovanie* [Nature Management], 2010, no. 18, pp. 5–8.
- [19] Malakhova E.G. *Sovershenstvovaniye lesovodstvennykh meropriyatiy i gosudarstvennogo lesopatologicheskogo monitoringa v elovykh lesakh Moskovskoy oblasti* [Improving forestry activities and state forest pathological monitoring in the spruce forests of the Moscow region]. Dis. ... Cand. Sci. (Agric.). Moscow, 2015.
- [20] Gninenko Yu.I., Khegay I.V. *Dinamika usykhaniya elovykh lesov v Moskovskom regione* [Dynamics of shrinkage of spruce forests in the Moscow region]. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry Information], 2018, no. 2, pp. 65–74.

Authors' information

Zakharov Vladimir Petrovich — Lead engineer of the State Governmental Institution of the Moscow reg. «Mosobilles», zakharov@forest.ru

Korotkov Sergey Aleksandrovich✉ — Cand. Sci. (Biology), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), skorotkov@mgul.ac.ru

Dubey Deyv — Student of the BMSTU (Mytishchi branch)

Received 16.12.2021.

Approved after review 24.02.2022.

Accepted for publication 27.04.2022.

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

ОСОБЕННОСТИ САМОВОЗОБНОВЛЕНИЯ СОСНЫ НА ГАРИ

О.И. Гаврилова^{1✉}, А.В. Грязькин²

¹ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», 185096, Республика Карелия, г. Петрозаводск, пр. Ленина, д. 33

²ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», 194021, г. Санкт-Петербург, Институтский пер, 5, литер У

ogavril@mail.ru

Изложены результаты комплексного исследования гари, образовавшейся на месте сгоревшего в 2006 г. сосняка скального в южной части Республики Карелия, на восток от Онежского озера. Установлено, что самовозобновление сосны на гари протекает успешно. Здесь сформировался молодняк смешанного состава. Численность подроста сосны составляет 2400 экз./га. Его количество практически в 2 раза превышает численность, установленную Правилами лесовосстановления 2020 года. Молодое поколение сосны характеризуется значительной дифференциацией как по высоте — от 0,3 до 5 м, так и по возрасту — от 3 до 15 лет. Анализ хода роста модельных экземпляров показал, что прирост в высоту в большей степени зависит от высоты подроста сосны, чем от возраста. Максимальные значения текущего пророста составляют 25...30 см/год. В составе подлеска преобладают рябина обыкновенная и ива козья. Общая численность подлесочных пород превышает 1460 экз./га. Живой напочвенный покров представлен 21 видом, из которых 12 видов — представители покрытосеменных растений и 9 видов мхов и лишайников. Доминируют ксерофиты — вереск, кладония, политрихум можжевеловый. Почвы бедные и характеризуется преобладанием олиготрофных видов — брусники, щавелька малого, лишайников. Отмечается успешное естественное лесовозобновление на месте сгоревшего сосняка скального.

Ключевые слова: гарь, сосняк скальный, подрост сосны, средний прирост по высоте

Ссылка для цитирования: Гаврилова О.И., Грязькин А.В. Особенности самовозобновления сосны на гари // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 3. С. 69–74. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-69-74

Лесные пожары — важнейший фактор, вызывающий кардинальные изменения состава и структуры лесных биогеоценозов [1–15]. Лесной фонд Республики Карелия (РК) регулярно подвергается воздействию лесных пожаров, чем объясняется актуальность исследований. В среднем за последние годы в лесном фонде РК площадь выгоревших лесов составляет от 50 до 200 га. Это, главным образом, древостой с преобладанием сосны в составе. Как правило, очаги пожаров фиксируются в спелых и перестойных сосняках [1, 2].

Устойчивый низовой пожар вызывает существенное сокращение запасов органического вещества в почве [9, 16–21]. На выходах скальных пород это проявляется в большей степени, поскольку здесь мощность почвы, как правило, всегда меньше [16, 19, 21].

Вместе с живым и мертвым напочвенным покровом выгорает и растительность нижних ярусов, а у древесных растений повреждается корневая система. Последствия такого воздействия — изменение видового состава растений живого напочвенного покрова, массовое усыхание древостоя, ветровал и возникновение обширных очагов энтомофитов и болезней [6, 9, 14, 16, 18, 20].

Восстановление плодородного слоя почвы и растительности на гари — процесс длительный. На начальном этапе восстановительных процессов органическое вещество накапливается в микропонижениях, трещинах, западинах [1, 19, 21]. Только после накопления определенного количества органического вещества возможно формирование живого напочвенного покрова. Параллельно с восстановлением почвы и растительности нижних ярусов создаются благоприятные условия для роста и развития древесных пород [1, 14, 17–20].

Цель работы

Цель работы — оценка успешности и особенностей самовозобновления сосны на гари в условиях РК.

Объект и методика исследования

Объектом исследований послужила гарь 2006 г. в южной части РК (на восток от Онежского озера) [16, 22–26]. Почвенные условия представлены в основном органометным горизонтом мощностью от 0 до 5 см по микропонижениям, которые чередуются с гранитными обнажениями.

До пожара на исследуемом участке произрастал сосняк скальный возрастом около 120 лет. До пожара в напочвенном покрове преобладали лишайники, а в составе подлеска — можжевеловый. Эти сведения получены из таксационного описания 2000 г.

Т а б л и ц а 1
Характеристика модельных растений
подроста сосны

Characteristics of pine undergrowth model specimens

Номер модельного растения	Высота, см	Возраст, лет	Возраст хвои, лет	Средний периодический прирост по высоте за 3 года, см
1	53	10	2	6
2	65	11	2	4,7
3	116	12	3	10,7
4	296	12	4	34
5	270	12	4	25,3
6	235	10	3	27
7	210	10	4	18,7
8	258	10	4	18,8
9	200	10	2	16,3
10	170	12	2	14
11	65	7	2	10
12	210	10	3	24
13	335	13	3	25
14	320	15	3	23
15	240	12	3	27,7
16	126	12	2	8
17	130	10	2	13
18	60	9	2	6
19	60	9	2	4,3
20	113	12	3	10,3
21	47	6	2	6
22	37	6	2	6,3
23	9	3	3	0,7

Т а б л и ц а 2
Структура молодняков на гари по группам
высот и по жизненному состоянию, экз./га
The young stands composition in the burnt area by groups
of heights and by vitality, ind./ha

Лесообразующая порода	Численность подроста, экз./га
Сосна обыкновенная (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	2400
Береза бородавчатая, повислая (<i>Betula pendula</i> Roth)	2100
Осина, тополь дрожащий (<i>Populus tremula</i> L.)	1400
Ольха серая (<i>Alnus incana</i> (L.) Moench)	500
Итого	6400

Последствиями низового пожара явился массовый ветровал и усыхание деревьев, что было связано с полным выгоранием органического вещества на выходах скальных пород. Кроме скальных выходов здесь на момент обследования сохранились остатки сгоревшей древесины. Древостой как основной компонент леса, еще не сформировался. Высота отдельных экземпляров подроста сосны достигала 5 м.

Для оценки успешности самовозобновления сосны проводился учет подроста на 30 учетных площадках. Размер круговой учетной площадки составил 10 м². На каждой площадке отмечалось количество подроста лесообразующих пород и высота. Все растения распределялись по категориям состояния на жизнеспособные, нежизнеспособные и сухие [2, 3, 16].

Для подлеска указывали видовой состав, численность растений и структуру по высоте. Кроме этого, на учетных площадках фиксировали виды в составе живого напочвенного покрова, а также их встречаемость и проективное покрытие. Динамику роста подроста сосны изучали по модельным экземплярам. Для этой цели были отобраны растения разной высоты — от 0,3 до 3,4 м (табл. 1).

У каждой модели подроста сосны измеряли высоту и величину текущего прироста по годам, возраст, диаметр и протяженность кроны. Кроме этого, указывали максимальный возраст хвои и отмечали особенности моделей.

Из 23 моделей подроста сосны возраст, соответствующий давности пожара, имели 7 растений. Остальные были представлены подростом более молодых генераций — от 3 до 9 лет. Лишь единичные особи представляли подрост предварительных генераций, это подрост, сохранившийся после пожара (модель 14, возраст 15 лет). Отдельные экземпляры подроста сосны высотой более 3 м достигли репродуктивного возраста и несут на себе шишки.

Результаты и обсуждение

Установлено, что возобновление сосны на гари протекает успешно. В пересчете на 1 га численность подроста сосны достигает 2,4 тыс. экз. Преобладает подрост в возрасте 12 лет, который появился на гари спустя 2 года после пожара. Вместе с сосной гарь заселяется березой, осинкой, ольхой. Общая численность молодого поколения лесообразующих пород составляет 6,4 тыс./га (табл. 2).

Подрост сосны представлен особями в возрасте от 3 до 15 лет. Средняя высота подроста сосны составляет 1,3 м. Преобладает подрост высотой до 1,5 м. Доля сухого подроста сосны незначительна — около 4 %. Как видно из табл. 2, доля сосны в составе подроста по численности — 38 %. На гари сформировался хвойно-лиственный молодняк. В соответствии с нормативами, указанными в Правилах лесовосстановления 2020 года минимальное количество жизнеспособного подроста сосны на сухих бедных почвах не менее 1,5 тыс./га — табл. 2 Правил (приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 4 декабря 2020 г. № 1014 «Об утверждении Правил лесовосстановления, состава проекта лесовосстановления, порядка разработки проекта лесовосстановления и внесения в него изменений») [22].

Таким образом, возобновление сосны на данной гари следует считать успешным.

Особенность распределения подростка сосны по площади состоит в том, что он концентрируется, главным образом, в микропонижениях, там, где формируется почвенный покров и появляются травяно-кустарничковый и мохово-лишайниковый ярусы.

На гари 14-летней давности подросток представлен ивой козьей (*Salix caprea* L.), ивой ушастой (*Salix aurita* L.), можжевельником обыкновенным (*Juniperus communis* L.), рябиной обыкновенной (*Sorbus aucuparia* L.), шиповником собачьим (*Rosa canina* L.), калиной обыкновенной (*Viburnum opulus* L.) и иргой круглолистной (*Amelanchier ovalis* Medik.). Общая численность подростка составляет 1460 экз./га. Преобладают растения высотой менее 0,9 м. Подросток, как и подрост, произрастает локально по местам сформировавшегося почвенного покрова, травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов.

Травяно-кустарничковый ярус представлен 12 видами. Преобладают вереск (встречаемость 57 %), иван-чай (встречаемость 33 %) и щавелек малый (встречаемость 27 %). В мохово-лишайниковом ярусе выявлено 9 видов. Преобладают политрихум можжевельниковый (встречаемость 90 %), кладония оленья (встречаемость 30 %). Для живого напочвенного покрова в целом характерна ярко выраженная мозаичность. Микроассоциации растений из состава живого напочвенного покрова чередуются с гранитными обнажениями.

Полученные биометрические характеристики модельных экземпляров подростка сосны позволяют сделать вывод о том, что рост и развитие молодого поколения протекают вполне успешно. Зависимость высоты от возраста подростка сосны характеризуется экспонентой (рис. 1), что свидетельствует об увеличении темпов роста с увеличением высоты подростка. Если у подростка высотой до 0,5 м средний прирост в высоту составляет 3...5 см/год, то у подростка высотой более 2 м — от 35 до 50 см/год. Величина прироста в высоту не всегда зависит от возраста подростка. Существенное влияние на ход роста оказывают микроусловия — освещенность и характеристики формирующегося почвенного покрова.

Текущий прирост молодого поколения сосны имеет большой размах варьирования и связан с высотой подростка. Зависимость величины среднего прироста за последние 3 года от высоты подростка сосны (прирост в высоту за вегетационные периоды 2018–2020 гг.) представлена на рис. 2. Эта зависимость характеризуется линейным уравнением вида $y = -0,086x + 1,2202$ ($R^2 = 0,906$).

Средний периодический прирост за 5 лет характеризуется аналогичной прямой, коэффициент детерминации равен 0,78.

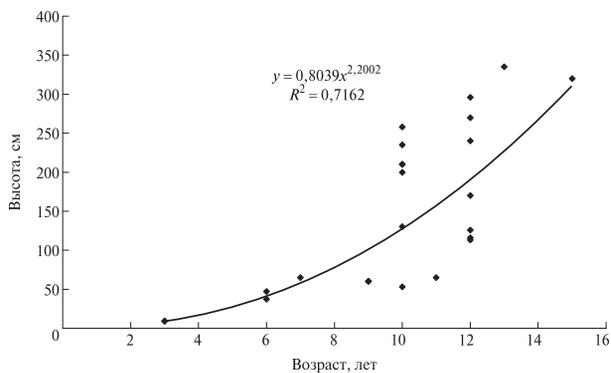


Рис. 1. Зависимость высоты подростка сосны от ее возраста
Fig. 1. Dependence of the pine undergrowth height on its age

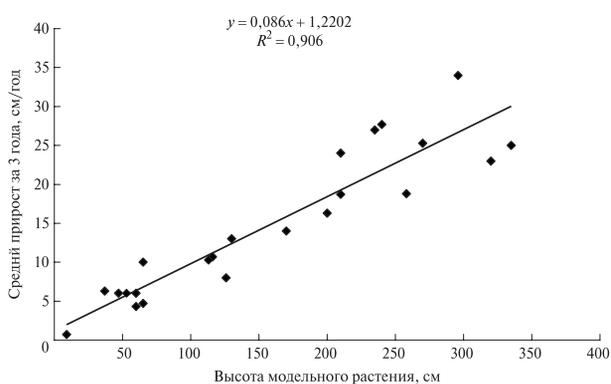


Рис. 2. Зависимость среднего текущего прироста подростка сосны за 2018–2020 гг. от высоты
Fig. 2. Dependence of the average current increase in pine undergrowth for 2018–2020 on height

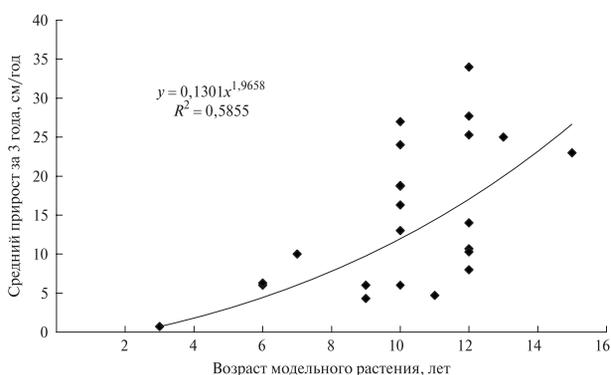


Рис. 3. Зависимость среднего текущего прироста за 3 года от возраста подростка сосны
Fig. 3. Dependence of the average current growth for 3 years on the pine undergrowth age

Динамика роста в высоту в определенной степени зависит от возраста подростка сосны. Зависимость среднего периодического прироста молодого поколения сосны на гари представлена на рис. 3. Эта зависимость менее выражена, чем зависимость величины прироста от высоты подростка сосны и описывается степенной кривой вида $y = 0,1301x^{1,9658}$ ($R^2 = 0,59$).

Выводы

Через 14 лет после устойчивого низового пожара вместо сгоревшего сосняка скального сформировался молодняк смешанного состава с преобладанием сосны. Общая численность подроста лесообразующих пород превышает 6 тыс./га.

В соответствии с установленными нормативами, естественное возобновление сосны на гари протекает успешно — численность подроста сосны составляет 2400 экз./га при нормативе 1500. Возраст подроста на гари имеет большой размах варьирования — от 3 до 15 лет. Структура по высоте выражена, встречается подрост высотой от 0,3 м до 5 м. С увеличением высоты растения, наблюдается увеличение величины текущего прироста. Текущий прирост в меньшей степени зависит от возраста. Таким образом, преобладание хвойного подроста здесь позволит в будущем сформироваться устойчивому древостою с преобладанием сосны в составе. В подлеске сохранится ива, рябина, калина и можжевельник.

Список литературы

- [1] Гаврилова О.И., Колганов Е.С., Пак К.А. Оценка успешности самовозобновления сосны на гари // Лесотехнический журнал, 2020. № 4. С. 142–150.
- [2] Грязькин А.В., Смирнов А.П., Кузнецов Е.Н., Павлов Ю.В., Показий Е.С. Динамика восстановления лесной растительности и характеристика почв на участках, пройденных лесным пожаром // Роль лесных пожаров в современном мире / Материалы Российско-Финляндской науч.-практ. конф. 15 апреля 2010 г., Консульство Финляндии в Санкт-Петербурге. СПб., 2010. С. 149–151.
- [3] Ильичев Ю.Н., Бушков Н.Т., Тараканов В.В. Естественное возобновление на гарях Среднеобских боров. Новосибирск: Наука, 2003. 196 с.
- [4] Ильичев Ю.Н. Оценка естественного возобновления хвойных пород на минерализованных и естественных участках вырубках на гарях // Интерэкспо ГЕО-Сибирь, 2017. Т. 3. № 2. С. 235–239.
- [5] Санников С.Н. Лесные пожары как фактор преобразования структуры, возобновления и эволюции биогеоценозов // Экология, 1983. № 6. С. 24–33.
- [6] Санникова Н.С., Санников С.Н., Кочубей А.А., Петрова И.В. Естественное возобновление сосны на гарях в лесостепи Западной Сибири // Сибирский лесной журнал, 2019. № 5. С. 22–29.
- [7] Bond W.J., Keeley J.E. Fire as a global herbivore: the ecology and evolution of flammable ecosystems // Trends in Ecology and Evolution, 2005, no. 20(7), pp. 387–394.
- [8] Borowski Z., Gil W., Rykowski K., Gawryś R., Pawlak B., Kwiatkowski M., Hilszczańska D., Plewa R., Szczygieł R., Olszowska G. 2020. Monitoring the processes of adaptation of the forest ecosystem to environmental changes as a result of fire against the background of artificial and natural regeneration of the forest in the Myszyniec Forest District // Technical Report no. 500–432 to General Directorate of State Forests, pp. 1–204.
- [9] Cairney J.W.G., Bastias B.A. Influences of fire on forest soil fungal communities // Canadian J. of Forest Research, 2007, 37(2), pp. 207–215.
- [10] De Bano L.F. The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: a review // J. of Hydrology, 2000, v. 231–232, pp. 195–206.
- [11] Dove N.C., Hart S.C. Fire reduces fungal species richness and in situ mycorrhizal colonization: a meta-analysis // Fire Ecology, 2017, no. 13, pp. 37–65.
- [12] Olchowik J., Hilszczańska D., Studnicki M., Malewski T., Kariman K., Borowski Z. Post-fire dynamics of ectomycorrhizal fungal communities in a Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) forest of Poland // Microbiology, 2021, PeerJ 9(e12076), pp. 1–17. DOI:10.7717/peerj.12076
- [13] Dove N.C., Hart S.C. Fire reduces fungal species richness and in situ mycorrhizal colonization: a meta-analysis // Fire Ecology, 2017, no. 13, pp. 37–65.
- [14] Hilszczańska D., Gil W., Olszowska G. Structure of post-fire ectomycorrhizal communities of Scots pine stand in a dry coniferous forest habitat // Sylwan, 2019, v. 163(1), pp. 71–79.
- [15] Perez-Izquierdo L., Clemmensen K.E., Strengbom J., Granath G., Wardle D.A., Nilsson M.C., Lindahl B.D. Crown-fire severity is more important than ground-fire severity in determining soil fungal community development in the boreal forest // J. of Ecology, 2021, v. 109, pp. 504–518.
- [16] Грязькин А.В., Беляева Н.В., Кази И.А., Ефимов А.В., Сырников И.А. Особенности роста подроста сосны под пологом древостоев на сухих бедных почвах // Research Science (Banská Bystrica), 2019, no. 8, pp. 3–6.
- [17] Мелехов И.С. Влияние пожаров на лес. М.; Л.: Изд-во и фототиполитограф. Гос. лесотехн. изд-ва, 1948. 126 с.
- [18] Нгуен Ван Зинь, Шахов А.Г., Ву Ван Хунг. Особенности самовозобновления сосны обыкновенной // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы II Междунар. науч.-техн. конф., СПб., 24–26 мая 2017 г. / под ред. В.М. Гедьо. СПб.: Изд-во СПбГЛТУ, 2017. Т. 1. С. 40–42.
- [19] Смирнов А.П., Грязькин А.В. Особенности почвенных условий и естественного возобновления на вырубках, пройденных огнем // Экология таежных лесов. Сыктывкар, 1998. С. 211.
- [20] McCarthy N., Bentsen N.S., Willoughby I., Balandier P. The state of forest vegetation management in Europe in the 21st century // European J. of Forest Research, 2011, v. 130, pp. 7–16.
- [21] Toberman H., Chen C., Lewis T., Elser J.J. High-frequency fire alters C: N: P stoichiometry in forest litter // Global Change Biology, 2013, v. 20 (7), p. 2321–31. <https://doi.org/10.1111/gcb.12432>
- [22] Правила лесовосстановления, состав проекта лесовосстановления, порядок разработки проекта лесовосстановления и внесения в него изменений. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573123762> (дата обращения 15.11.2021).
- [23] Краснов М.Л. Естественное возобновление сосны в связи с рубками и пожарами // Бузулукский бор. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1950. Т. 2. С. 3–97.
- [24] Хлюстов В.К., Гаврилова О.И., Морозова И.В. Лесные культуры Карелии (Этапы раннего возраста). М.: Изд-во РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2007. 233 с.
- [25] Lindgren D., Prescher F. Optimal clone number for seed orchards with tested clones // Silvae Genetica, 2005, v. 54, iss. 2, pp. 80–92. DOI: 10.1515/sg-2005-0013
- [26] Ne'eman G., Izhaki I. Stability of pre- and post-fire spatial structure of pine trees in Aleppo pine forest // Ecography, 1998, v. 21, pp. 535–542.

Сведения об авторах

Гаврилова Ольга Ивановна [✉] — д-р с.-х. наук, профессор ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», ogavril@mail.ru

Грязькин Анатолий Васильевич — д-р биол. наук, профессор ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», lesovod@bk.ru

Поступила в редакцию 17.12.2021.

Одобрено после рецензирования 27.01.2022.

Принята к публикации 27.04.2022.

PINE SELF-REGENERATION IN BURNT FOREST AREA

O.I. Gavrilova^{1✉}, A.V. Gryazkin²

¹Petrozavodsk State University, 33, Lenin av., 185096, Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia

²St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov, 5, Institutsky Lane, letter U, 194021, St. Petersburg, Russia

ogavril@mail.ru

The results of a comprehensive study of the burnt area formed in 2006 on the site of a rocky pine forest in the southern part of the Republic of Karelia, east of Lake Onega, are presented. It has been established that the self-renewal of pine in the burnt area proceeds successfully. Here, young animals of mixed composition were formed. The number of pine undergrowth is 2400 ind./ha. Its number is almost 2 times higher than the number established by the 2020 Reforestation Rules. The young generation of pine is characterized by significant differentiation both in height — from 0.3 to 5 m, and in age — from 3 to 15 years. Analysis of the course of growth of model specimens showed that the increase in height depends to a greater extent on the height of the pine undergrowth than on age. The maximum values of the current growth are 25...30 cm/year. The composition of the undergrowth is dominated by mountain ash and goat willow. The total number of undergrowth species exceeds 1460 ind./ha. Living ground cover is represented by 21 species, of which 12 species are representatives of angiosperms and 9 species of mosses and lichens. Xerophytes dominate — heather, cladonia, juniper polytrichum. The soils are poor and are characterized by the predominance of oligopeat species — lingonberries, small sorrel, lichens. Successful natural reforestation is noted on the site of a burnt rocky pine forest.

Keywords: post-fire area, rock pine, the young generation of pine, average height gain

Suggested citation: Gavrilova O.I., Gryazkin A.V. *Osobennosti samovozobnovleniya sosny na gari* [Pine self-regeneration in burnt forest area]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 3, pp. 69–74.

DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-69-74

References

- [1] Gavrilova O.I., Kolganov E.S., Pak K.A. *Otsenka uspekhnosti samovozobnovleniya sosny na gari* [Evaluation of the success of self-renewal of pine on burnt-out]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry journal], 2020, no. 4, pp. 142–150.
- [2] Gryaz'kin A.V. Smirnov A.P., Kuznetsov E.N., Pavlov Yu.V., Pokaziy E.S. *Dinamika vosstanovleniya lesnoy rastitel'nosti i kharakteristika pochv na uchastkakh proydennykh lesnym pozharom* [Dynamics of forest vegetation restoration and characteristics of soils in areas affected by forest fires]. *Rol' lesnykh pozharov v sovremennom mire. Materialy Rossiysko-Finlyandskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [The role of forest fires in the modern world. Materials of the Russian-Finnish scientific-practical conference], St. Petersburg, April 15, 2010, Consulate of Finland in St. Petersburg. St. Petersburg, 2010, pp. 149–151.
- [3] Il'ichev Yu.N., Bushkov N.T., Tarakanov V.V. *Estestvennoe vozobnovlenie na garyakh Sredneobskikh borov* [Natural renewal on burnt-out areas of the Sredneobskiy pine forests]. Novosibirsk: Nauka. Sibirskoe otdelenie [Science. Sib. branch], 2003, 196 p.
- [4] Il'ichev Yu.N. *Otsenka estestvennogo vozobnovleniya khvoynykh porod na mineralizovannykh i estestvennykh uchastkakh vyrubok na garyakh* [Assessment of natural regeneration of conifers in mineralized and natural areas of clearings on burned-out areas]. *Interexpo GEO-Sibir'* [Interexpo GEO-Siberia], 2017, t. 3, pp. 235–239.
- [5] Sannikov S.N. *Lesnye pozhary kak faktor preobrazovaniya struktury, vozobnovleniya i evolyutsii biogeotsenozov* [Forest fires as a factor of structure transformation, renewal and evolution of biogeocenoses]. *Ekologiya* [Ecology], 1983, no. 6, pp. 24–33.
- [6] Cannikova N.S., Sannikov S.N., Kochubey A.A., Petrova I.V. *Estestvennoe vozobnovlenie sosny na garyakh v lesostepi Zapadnoy Sibiri* [Natural restoration of pine on gars in the forest steppe of Western Siberia]. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* [Siberian forest journal], 2019, no. 5, pp. 22–29.
- [7] Bond W.J., Keeley J.E. Fire as a global herbivore: the ecology and evolution of flammable ecosystems. *Trends in Ecology and Evolution*, 2005, no. 20(7), pp. 387–394.
- [8] Borowski Z., Gil W., Rykowski K., Gawryś R., Pawlak B., Kwiatkowski M., Hilszczanska D., Plewa R., Szczygieł R., Olszowska G. 2020. Monitoring the processes of adaptation of the forest ecosystem to environmental changes as a result of fire against the background of artificial and natural regeneration of the forest in the Myszyńiec Forest District. *Technical Report no. 500–432 to General Directorate of State Forests*, pp. 1–204.

- [9] Cairney J.W.G., Bastias B.A. Influences of fire on forest soil fungal communities. *Canadian J. of Forest Research*, 2007, 37(2), pp. 207–215.
- [10] De Bano L.F. The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: a review. *J. of Hydrology*, 2000, v. 231–232, pp. 195–206.
- [11] Dove N.C., Hart S.C. Fire reduces fungal species richness and in situ mycorrhizal colonization: a meta-analysis // *Fire Ecology*, 2017, no. 13, pp. 37–65.
- [12] Olchowik J., Hilszczańska D., Studnicki M., Malewski T., Kariman K., Borowski Z. Post-fire dynamics of ectomycorrhizal fungal communities in a Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) forest of Poland. *Microbiology*, 2021, PeerJ 9(e12076), pp. 1–17. DOI:10.7717/peerj.12076
- [13] Dove N.C., Hart S.C. Fire reduces fungal species richness and in situ mycorrhizal colonization: a meta-analysis. *Fire Ecology*, 2017, no. 13, pp. 37–65.
- [14] Hilszczańska D., Gil W., Olszowska G. Structure of post-fire ectomycorrhizal communities of Scots pine stand in a dry coniferous forest habitat. *Sylvan*, 2019, v. 163(1), pp. 71–79.
- [15] Perez-Izquierdo L., Clemmensen K.E., Strengbom J., Granath G., Wardle D.A., Nilsson M.C., Lindahl B.D. Crown-fire severity is more important than ground-fire severity in determining soil fungal community development in the boreal forest. *J. of Ecology*, 2021, v. 109, pp. 504–518.
- [16] Gryaz'kin A.V., Belyaeva N.V., Kazi I.A., Efimov A.V., Syrnikov I.A. *Osobennosti rosta podrosta sosny pod pologom drevostoev na sukhikh bednykh pochvakh* [Features of the growth of pine undergrowth under the canopy of forest stands on dry poor soils]. *Research Science (Banská Bystrica, Slovakia)*, 2019, no. 8, pp. 3–6.
- [17] Melekhov I.S. *Vliyanie pozharov na les* [The impact of fires on the forest]. Moscow-Leningrad: Izd-vo i fototipolitogr. Gos. lesotekhn. izd-va, 1948, 126 p.
- [18] Nguen Van Zin', Shakhov A.G., Vu Van Khung *Osobennosti samovozobnovleniya sosny obyknovlennoy* [Features of self-renewal of Scots pine. Forests of Russia: politics, industry, science, education]. *Les Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie: materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii* [Materials of the second International scientific and technical conference]. Ed. V.M. Ged'o. St. Petersburg, May 24–26 2017. St. Petersburg: SPbGLTU, 2017, t. 1, pp. 40–42.
- [19] Smirnov A.P., Gryaz'kin A.V. *Osobennosti pochvennykh usloviy i estestvennogo vozobnovleniya na vyrubkakh, proydennykh ognem* [Peculiarities of soil conditions and natural regeneration in clear-cut areas traversed by fire]. *Ekologiya taizhnykh lesov* [Ecology of taiga forests]. Syktyvkar, 1998, p. 211.
- [20] McCarthy N., Bentsen N.S., Willoughby I., Balandier P. The state of forest vegetation management in Europe in the 21st century. *European J. of Forest Research*, 2011, v. 130, pp. 7–16.
- [21] Toberman H., Chen C., Lewis T., Elser J.J. High-frequency fire alters C: N: P stoichiometry in forest litter. *Global Change Biology*, 2013, v. 20 (7), p. 2321–31. <https://doi.org/10.1111/gcb.12432>
- [22] *Pravila lesovosstanovleniya, sostav proekta lesovosstanovleniya, poriyadok razrabotki proekta lesovosstanovleniya i vneseniya v nego izmeneniy* [The rules of reforestation, the composition of the reforestation project, the procedure for developing a reforestation project and making changes to it]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/573123762> (accessed 15.11.2021).
- [23] Krasnov M.L. *Estestvennoe vozobnovlenie sosny v svyazi s rubkami i pozharemi* [Natural renewal of pine in connection with fellings and fires]. Buzuluk bor. Moscow-Leningrad: Goslesbumizdat, 1950, t. 2, pp. 3–97.
- [24] Khlyustov V.K., Gavrilova O.I., Morozova I.V. *Lesnye kul'tury Karelii (Etapy rannego vozrasta)* [Forest cultures of Karelia (Early age stages)]. Moscow: RGAU-Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazeva, 2007, 233 p.
- [25] Lindgren D., Prescher F. Optimal clone number for seed orchards with tested clones. *Silvae Genetica*, 2005, v. 54, iss. 2, pp. 80–92. DOI: 10.1515/sg-2005-0013
- [26] Ne'eman G., Izhaki I. Stability of pre- and post-fire spatial structure of pine trees in Aleppo pine forest. *Ecography*, 1998, v. 21, pp. 535–542.

Authors' information

Gavrilova Ol'ga Ivanovna — Dr. Sci. (Agriculture), Professor of the Petrozavodsk State University, ogavril@mail.ru

Gryaz'kin Anatoliy Vasil'evich — Dr. Sci. (Biology), Professor of the St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov, lesovod@bk.ru

Received 17.12.2021.

Approved after review 27.01.2022.

Accepted for publication 27.04.2022.

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

НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ СИЛАМИ И СРЕДСТВАМИ ПОЖАРОТУШЕНИЯ

Н.А. Коршунов¹, В.А. Савченкова^{1, 2✉}, А.В. Перминов¹, М.Е. Конюшенков¹

¹ФБОУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства» (ФБУ ВНИИЛМ), 141202, Московская обл., г. Пушкино, ул. Институтская, д. 15

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

v9651658826@yandex.ru

Рассматривается проблема территориального рассредоточения пожарных вдоль периметра лесного пожара в ходе его тушения. Приведено обоснование необходимости решения вопроса координации действий пожарных в условиях постоянно изменяющейся внешней среды с учетом задач, стоящих перед руководителем тушением лесного пожара. Обоснована актуальность создания автоматизированной системы управления силами и средствами тушения лесного пожара, а также методики управления силами и средствами пожаротушения при ликвидации крупных лесных пожаров. Определены основные задачи, лежащие в основе методики управления силами пожаротушения и техническими решениями: формирование ситуационной осведомленности для участников тушения пожара и обеспечение эффективной коммуникации за счет внедрения ее новых форм между участниками тушения. Представлена реализация указанной методики в виде автоматизированной системы управления, которая войдет в состав подсистемы информационной системы дистанционного мониторинга ИСДМ-Рослесхоз. Проведен теоретический анализ основных управленческих задач, возникающих перед руководителем тушения лесного пожара. С учетом интеллектуальных и технических наработок, приведено обоснование целесообразности интегрирования подсистемы в существующую информационную систему дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства. Определена значимость работы, которая заключается в разработке алгоритмов автоматизированного формирования рекомендаций для принятия управленческих решений при организации тушения крупных лесных пожаров, внедрения электронных форм коммуникации при тушении лесного пожара. Определены информационные связи между участниками производственных процессов. Приведен пример составления схемы тушения лесного пожара. Представлен порядок действий руководителя тушением лесного пожара и руководителей, подчиненных ему подразделений, а также типовой алгоритм их работы. Указаны блоки автоматизированной системы управления для каждого этапа ее создания. Приведены планируемые результаты исследования.

Ключевые слова: лесной пожар, автоматизированная система, методика, тушение

Ссылка для цитирования: Коршунов Н.А., Савченкова В.А., Перминов А.В., Конюшенков М.Е. Научное обоснование методики автоматизированного управления силами и средствами пожаротушения // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 3. С. 75–84. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-75-84

Своевременное и достоверное формирование научно-аналитической информации для принятия оперативных управленческих решений при организации тушения крупных лесных пожаров на сегодняшний день крайне актуально.

Наиболее важной задачей при тушении лесных пожаров является быстрая и эффективная ликвидация пожара, спланированная так, чтобы совокупный ущерб был минимальным [1–5]. Управление ходом тушения, транспортировкой сил и средств к месту пожара и выводом сил к местам постоянной дислокации представляет собой сложный процесс и осуществляется, как правило, самыми опытными сотрудниками лесопожарных организаций. Решения требуют значительных временных затрат, анализа большого объема информации, и их не всегда можно назвать оптимальными. В повышении эффективности управления противопожарными силами помогут методика моделирования, имитационная модель

и информационная система, с помощью которых можно принять оптимальные решения по управлению силами и средствами пожаротушения в условиях действующего лесного пожара с учетом характеристик распространения пожара, возможностей, имеющихся в наличии противопожарных сил и средств, и действующих регламентов по тушению лесных пожаров [6–10].

Для выбора правильной стратегии и эффективной тактики тушения крупного лесного пожара, особенно в условиях большой вариативности условий горения и разнородных по структуре и численности задействованных сил и средств пожаротушения, руководитель тушения пожара должен обладать актуальной и достоверной информацией [11–16].

Кроме того, для снижения рисков ошибочного принятия управленческих решений, необходимо автоматизировать процессы сбора ключевой информации о лесном пожаре, взаимодействие между участниками тушения, формирование рекомендаций для принятия управленческих

решений (в случае, когда они основываются на формализованных алгоритмах).

Таким образом, повышение эффективности организации тушения крупных лесных пожаров возможно за счет создания автоматизированной системы управления (АСУ) силами и средствами тушения, применяемыми при ликвидации крупного лесного пожара [17–21].

Учитывая имеющиеся интеллектуальные и технические наработки, а также реализованную функциональность для смежных задач в информационно-аналитической системе дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (далее — ИСДМ-Рослесхоз) целесообразно интегрировать модуль АСУ в качестве подсистемы ИСДМ-Рослесхоз, а не заниматься разработкой нового аппаратно-программного комплекса [22–24]. Для этого целесообразно разработать методику управления силами и средствами пожаротушения на крупном лесном пожаре.

Цель работы

Цель работы – разработка научно обоснованных предложений по созданию АСУ силами и средствами тушения, применяемыми при ликвидации крупного лесного пожара интегрированной в ИСДМ-Рослесхоз.

Объекты и методы исследований

Объектами исследования являются организационные процессы тушения крупных лесных пожаров.

За основу принята аналитически-экспериментальная стратегия исследования. В частности, проведен предварительный теоретический анализ основных управленческих задач, возникающих перед руководителем тушения лесного пожара, в целях выявления тех из них, которые можно автоматизировать. Собраны сведения об управленческих и информационных процессах, а также о реальных потребностях и пожеланиях в области информатизации от руководителей тушения лесных пожаров.

Метод работы — анализ проблематики тушения крупных лесных пожаров, определение перспективных технических решений, разработка методики управления сил и средств пожаротушения. Анализ научных публикаций, технической документации, нормативно-правовых актов в области лесного законодательства Российской Федерации и других стран, ведомственной отчетности, предоставляемой органами исполнительной власти субъектов Российской Федерации Рослесхозу и обрабатываемые ФГБУ «Рослесинфорг» и ФБУ «Авиалесоохрана», данных ИСДМ-Рослесхоз, статистической отчетности, размещаемой в открытых источниках.

Результаты и обсуждение

В результате исследований периода 2018–2020 гг. на основе анализа практики тушения крупных лесных пожаров выявлено, что на проблему эффективности руководства силами и средствами пожаротушения на крупном лесном пожаре, в максимальной степени влияют следующие причины:

- недостаточный уровень информированности руководителей подразделений и руководителя тушения крупного лесного пожара;
- недостаточный уровень понимания руководителями подразделений текущей ситуации и поставленных им задач;
- низкий уровень коммуникации между подразделениями и отдельными специалистами;
- неудовлетворительный уровень взаимодействия между подразделениями, особенно между формированиями разной ведомственной принадлежности.

Борьба с крупными лесными пожарами подразумевает территориальное рассредоточение пожарных вдоль периметра пожара. Важным элементом успешности борьбы является оперативная координация действий пожарных в условиях постоянно изменяющейся внешней среды. Вербальные способы коммуникации по каналам радио- или телефонной связи не всегда обеспечивают ясность понимания задач подчиненными и оперативность принятия решений руководителями. Возникает необходимость в более объемных и быстрых способах обмена информацией и обеспечения процессов принятия оперативных решений.

Следовательно, в основе разрабатываемой методики управления силами пожаротушения и технических решений для ее реализации лежит решение двух основных задач:

- 1) формирование ситуационной осведомленности для участников тушения пожара;
- 2) обеспечение эффективной коммуникации за счет внедрения новых форм коммуникации между участниками тушения.

Решение проблем ситуационной осведомленности и эффективной коммуникации и взаимодействия на крупном пожаре – это оптимальное сочетание единой (унифицированной) методики управления силами и средствами в ходе тушения крупного лесного пожара, реализуемой на современной технической платформе в единой информационной среде по средствам технических каналов связи с элементами автоматизации сбора и отображения информации на унифицированном интерфейсе в персональных средствах.

Методическая основа управления силами пожаротушения, положенная в основу концепции АСУ (уровень руководства тушением крупного

Рис. 1. Построение руководителем тушения лесного пожара четырех уровневой вертикальной структуры подчиненности участников процесса тушения крупного лесного пожара на принципах единоначалия (здесь и на рис. 2): РТП — руководитель тушением пожара; РС — руководитель сектора; РУ — руководитель участка; РГ — руководитель группы; ЛП — лесной пожарный; ТЕ — тактическая единица, пожарный трактор, автоцистерна, бульдозер и т. д.; П — пожарный

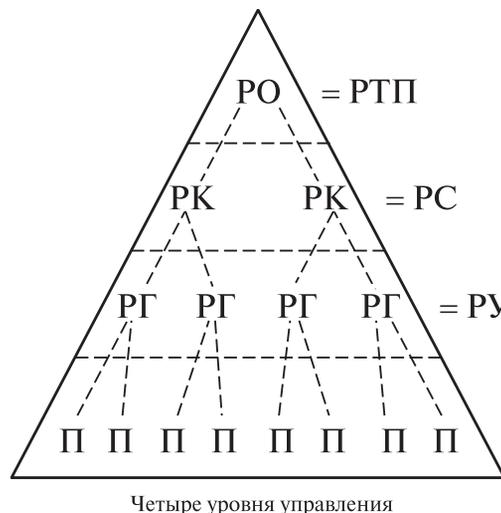


Fig. 1. Construction by the head of forest fire extinguishing of a 4-level vertical structure of subordination of participants in the process of extinguishing a large forest fire, based on the principles of unity of command (here and in fig. 2): РТП — is the head of fire extinguishing; РС — is the head of the sector; РУ — is the head of the site; РГ — is the head of the group; ЛП — is a forest firefighter; ТЕ — is a tactical unit, a fire tractor, a tanker truck, a bulldozer, etc.; П — is a firefighter

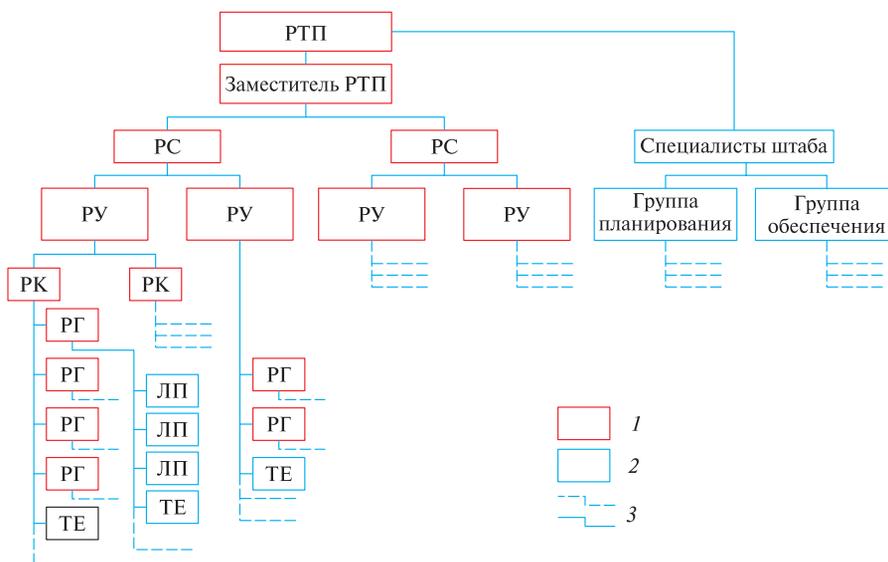


Рис. 2. Пример установленной руководителем тушения лесного пожара иерархии подчиненности и технологической роли руководителей подразделений: 1 — должностное лицо с правом отдачи распоряжений, команд, приказов — командная позиция; 2 — работник, специалист или тактическая единица (автоцистерна, трактор, бульдозер и пр.); 3 — линия власти, подчиненности

Fig. 2. An example of the hierarchy of subordination and technological role of the heads of departments established by the head of forest fire extinguishing: 1 — an official with the right to issue orders, commands, orders — a command position; 2 — employee, specialist or tactical unit (tanker truck, tractor, bulldozer, etc.); 3 — line of authority, subordination

лесного пожара), подсистемы ИСДМ-Рослесхоз на уровне одного условного крупного лесного пожара, предполагает следующий порядок действий руководителя тушением лесного пожара и руководителей, подчиненных ему подразделений:

1) построение руководителем тушения лесного пожара вертикальной структуры подчиненности участников процессов тушения крупного лесного пожара на принципах единоначалия (рис. 1) в соответствии с требованиями Правил тушения лесных пожаров, утвержденных приказом Минприроды России от 08.07.2014 № 313.

2) авторизация пользователей (участников тушения крупного лесного пожара) в АСУ в соответствии установленной руководителем тушения лесного пожара иерархии подчиненности и технологической роли (рис. 2);

3) формирование текстовой части в унифицированном WEB-интерфейсе АСУ, отображающей текущую ситуацию о построении вертикали управления на данном пожаре и способах осуществления взаимодействия, в том числе с использованием электронных форм (внутренний чат, передача графических сообщений);

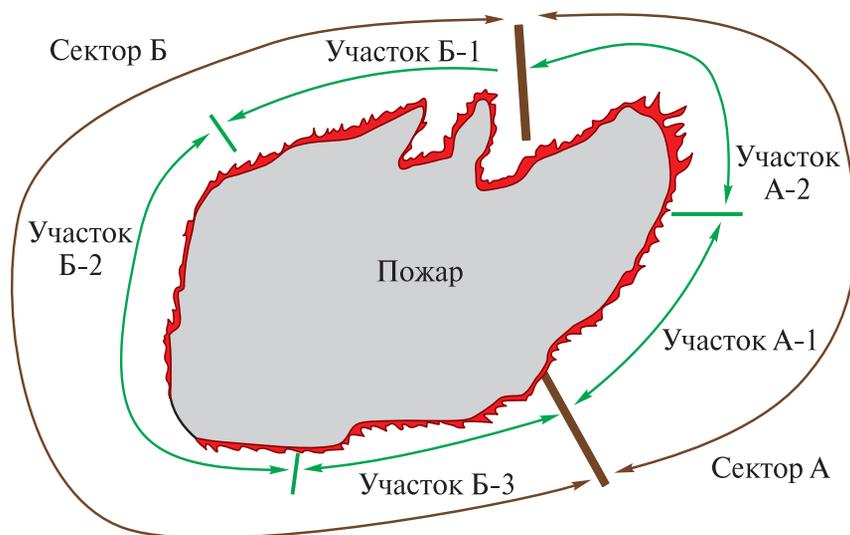


Рис. 3. Пример распределения участков и секторов на пожаре между подчиненными руководителями подразделений

Fig. 3. Example of the distribution of plots and sectors in a fire between subordinate heads of departments

4) формирование графического изображения в унифицированном WEB-интерфейсе АСУ, отражающего текущую ситуацию на лесном пожаре, которое содержит:

- контур лесного пожара на момент времени, полученный по данным ИСДМ-Рослесхоз и/или нанесенный руководителем тушения лесного пожара посредством унифицированного WEB-интерфейса;

- топографическую основу с привязкой географических координат (в формате ПЗ.90.02 или ПЗ.90.11), возможно, с добавлением тематических слоев, дорожной сети, квартальной сети, карт участков с категориями лесной растительности, гидрографии и т. п.;

- критические направления распространения пожара;

- естественные или искусственные рубежи, по данным руководителя тушением лесного пожара, руководителя лесопожарного подразделения и справочника с объектами противопожарного обустройства, размещенного в ИСДМ-Рослесхоз;

- фактическое расположение и состав подразделений (по данным, полученным от авторизированных пользователей в автоматическом режиме) на местности, состав отдельных подвижных средств тушения, полученных по данным сигналов датчиков спутниковой навигации;

5) осуществление руководителем тушения лесного пожара постановки основных задач подчиненным подразделениям, распределения участков и секторов на пожаре между подчиненными руководителями подразделений (рис. 3), отображения их в текстовой и графической части унифицированного WEB-интерфейса;

6) принятие руководителем тушения лесного пожара мер по организации коммуникации между руководящими работниками, специалистами, диспетчерским центром;

7) принятие руководителем тушения лесного пожара мер по организации разведки и сбору информации, установлению периодичности докладов от руководителей подчиненных подразделений, внесению ими в унифицированный WEB-интерфейс контрольных данных о достигнутых результатах;

8) формирование (обновление) в текстовой и графической части WEB-интерфейса данных об изменениях текущей ситуации и достигнутых результатах, посредством поступления данных от сигналов датчиков спутниковой навигации пользователей (терминалы руководителей подразделений, специалистов, подвижных средств разведки и тушения) и путем редактирования информации непосредственно руководителями подразделений в течение установленного периода выполнения подразделениями поставленных руководителем тушения лесного пожара задач;

9) осуществление информационного обмена между пользователями посредством чатов и электронных сообщений, средствами, предусмотренными в унифицированном WEB-интерфейсе, в течение установленного периода выполнения подразделениями поставленных руководителем тушения лесного пожара задач;

10) проведение руководителем тушения лесного пожара корректировки и полное изменение задач подчиненными подразделениями с соответствующим изменением информации в графической и текстовой частях WEB-интерфейса в

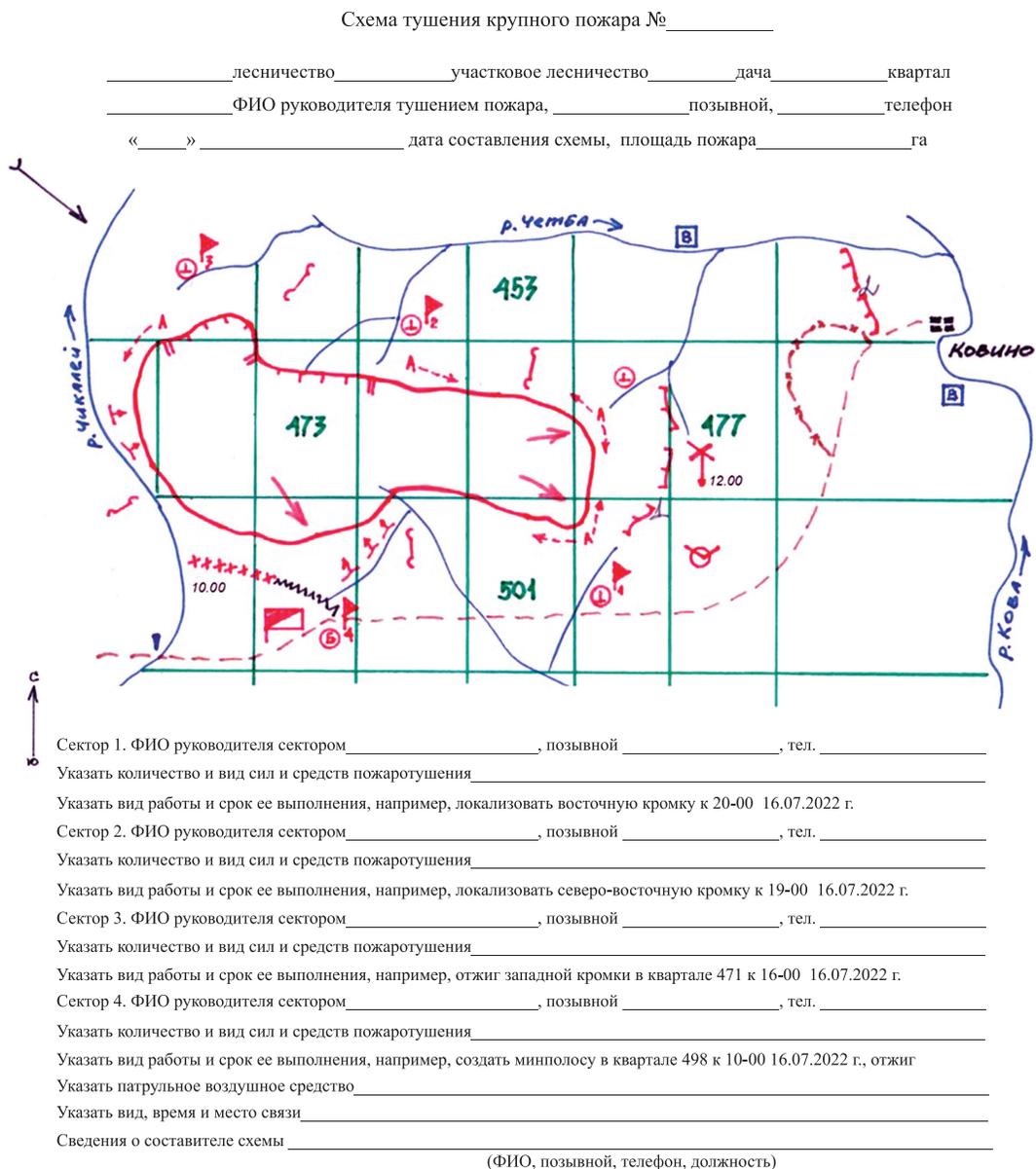


Рис. 4. Пример составления рабочей схемы тушения крупного лесного пожара, согласно требованиям Правил тушения лесных пожаров

Fig. 4. Example of drawing up a working scheme for extinguishing a large forest fire, according to the requirements of the Rules for extinguishing forest fires

случае существенных изменений лесопожарной обстановки;

11) обновление отображаемой информации на терминалах пользователей и непосредственно в подсистеме ИСДМ-Рослесхоз при поступлении информации от различных пользователей, автоматических систем и при редактировании данных руководителем тушения лесного пожара и руководителями подразделений в унифицированном WEB-интерфейсе;

12) хранение (архивирование) в АСУ данных о динамике изменения лесопожарной ситуации, ходе и результатах тушения, диалогах при осуществлении электронной коммуникации по окончании работ по тушению крупного лесного пожара.

Целесообразно, чтобы отображение информации в унифицированном WEB-интерфейсе повторяло функциональные решения классической схемы тушения крупного лесного пожара [25]. Должны быть использованы типовые символы для отображения тактической обстановки в соответствии с Приложением № 1 указанных правил (рис. 4).

Для отображения тактической обстановки используют следующие основные цвета:

- зеленый — квартальная сеть, номера кварталов, границы земель лесного фонда, отдельные насаждения, тип растительности;
- синий — естественные и искусственные водоемы (реки, ручьи, озера, пруды, болота и т. п.), места забора воды;

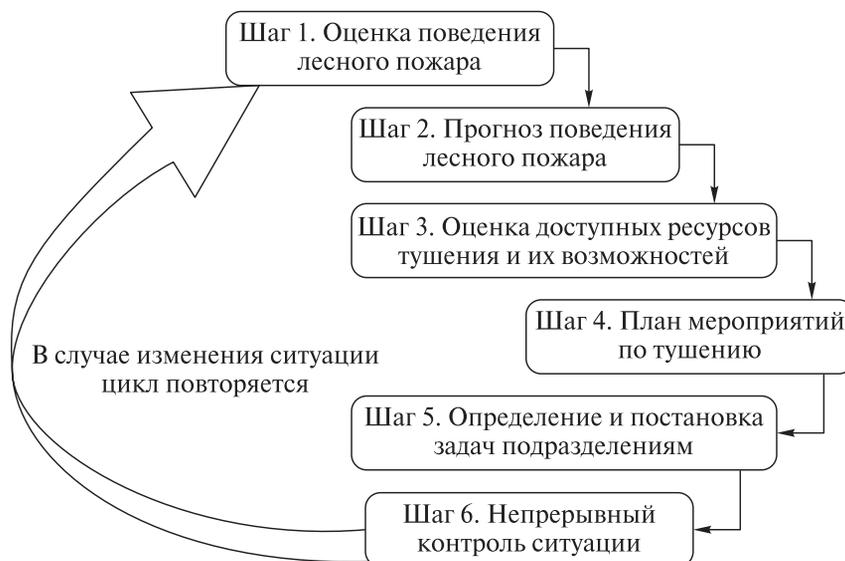


Рис. 5. Типовой алгоритм работы руководителя тушением пожара, руководителя сектора, руководителя участка — «Цикл управления»

Fig. 5. Typical algorithm for the work of a fire extinguishing manager, a sector manager, a site manager — «Control cycle»

– красный — контур действующего пожара, направление распространения пожара, места размещения (высадки) авиапожарных групп (команд), наземных лесопожарных подразделений (формирований) и пунктов управления, графическое отображение поставленных задач для подразделений (формирований);

– черный — населенные пункты, направление ветра, имеющиеся (или уже созданные в ходе тушения лесного пожара) опорные линии (минерализованные полосы, разрывы, барьеры), потушенные (недействующие) участки лесного пожара, текст к графическим элементам; также черный цвет используют для отображения статичных объектов и выполненных (завершенных) действий, уточняющих подписей к графическим фигурам, наименованиям объектов;

– коричневый — дороги, тропинки, пути подъезда, возвышенности, естественные и искусственные преграды;

– желтый — границы территории, на которой осуществляются действия по тушению лесного пожара (по сути, это зона полномочий и ответственности РТП), и прогнозируемый контур лесного пожара.

Любая информация за пределами контура пожара относится к действиям сил и средств.

В перспективной АСУ тушением крупного лесного пожара должна быть реализована возможность связи между всеми пользователями посредством адресных электронных сообщений отдельным пользователям и группам пользователей. Целесообразно предусмотреть возможность передачи видеоданных и фотографий по запросам пользователей. Реализация в АСУ возможности

передачи видеоданных в режиме on-line носит спорный характер. Существует мнение некоторых лесопожарных специалистов о полезности работы с видеоданными. С точки зрения процессов управления силами наличие такой возможности в действительности не всегда положительно влияет на эффективность процессов управления, так как видеоданные, по сути, являются «необработанным» объемом информации и потребуют от руководителя существенных затрат времени на ее обработку (на осмысление увиденного) в целях выделения ключевых параметров, необходимых для формирования решения. Подобную «интеллектуальную» обработку могут осуществлять работники, находящиеся непосредственно на месте событий, самостоятельно выделять необходимые параметры и сообщать о них руководителям. При этом с технической точки зрения, одномоментная передача больших объемов данных (видеопотоков) в режиме on-line существенно загружает технические каналы связи, вызывает рост сложности и стоимости оборудования (средств связи). Получение видеоданных в режиме on-line имеет смысл только при проведении авиаразведки. В основном значительные объемы видео- и фотоданных целесообразны для решения задач документирования событий, т. е. без режима on-line.

Создание и использование подобного технического инструмента руководителем тушения лесного пожара и руководителями подразделений при тушении крупного лесного пожара позволяет выполнять следующие действия:

– преодолеть проблему обеспечения устойчивости управления, так как необходимая вертикаль управления жестко «закрепляется» техническим

решением, которое не позволяет выйти участникам за пределы установленных руководителем тушения лесного пожара параметров;

– обеспечить своевременное доведение команд и решений в контуре управления, их формализацию, возможность оценки их эффективности через составление достигнутых результатов, и их ретроспективной оценки;

– улучшить ситуационную осведомленность руководящих работников и минимизировать проблему фрагментации понимания текущей лесопожарной обстановки, общего замысла тушения крупного лесного пожара;

– получить эффект синхронизации действий (самоорганизации) лесопожарных подразделений (формирований), причем с минимальным участием руководителя тушением лесного пожара при решении данной задачи;

– существенно уменьшить интеллектуальные и временные затраты руководителя тушением лесного пожара, руководителей секторов и участков тушения на пожаре на реализацию типовых циклов (алгоритмов) управления (рис. 5), ориентировочно в 2 раза и более, что способствует более быстрому принятию необходимых решений в условиях динамично изменяющейся лесопожарной обстановки, следствием чего будет повышение эффективности сил и средств пожаротушения;

– минимизировать вероятность получения «ложной» информации, что повышает персональную ответственность исполнителей за результат тушения крупного лесного пожара и уполномоченных органов исполнительной власти субъекта Российской Федерации в области лесных отношений.

На начальном этапе создания перспективной автоматизированной системы управления целесообразно отработать следующие блоки:

– блок отображения информации — создание интуитивно понятного унифицированного WEB-интерфейса в ИСДМ-Рослесхоз и полевых терминах;

– блок коммуникации — создание терминала доступа и базовой станции, определения оптимальных каналов технической связи (УКВ-радиосвязь 5–6-го поколения, полевая Wi-Fi сеть, спутниковая связь, «локальный интернет» по средствам беспилотного летательного аппарата).

На втором этапе создания перспективной АСУ целесообразно создать следующие блоки:

– блок поддержки принятия решений;

– блок прогнозирования развития контура лесного пожара;

– блок расчета достаточности сил и средств пожаротушения.

Таким образом, разработка алгоритмов автоматизированного формирования рекомендаций

для принятия управленческих решений при организации тушения крупных лесных пожаров, внедрения электронных форм коммуникации при тушении лесного пожара определяются как основные задачи, лежащие в основе методики управления силами пожаротушения.

Выводы

С учетом имеющихся отечественных технических решений в области цифровых коммуникаций сформирована оптимальная техническая схема организации информационных потоков, позволяющих интегрировать деятельность подразделений непосредственно на лесном пожаре в сложных полевых условиях и отображения данных в ИСДМ-Рослесхоз. Определены информационные связи между участниками процессов («пользователями» системы, «поставщиками» информации), предложены информационные слои для создания унифицированного интерфейса в АСУ.

На основе результатов работы предполагается подготовка инновационной продукции — методики управления силами и средствами тушения, применяемыми при ликвидации крупного лесного пожара, на основании АСУ, интегрированной в ИСДМ-Рослесхоз. Разработка и реализация нового инновационного научно-технического результата заключается в том, что научно обоснованные предложения позволят создать не имеющую аналогов в Российской Федерации АСУ поддержки принятия управленческих решений при организации тушения крупных лесных пожаров.

Список литературы

- [1] Валендик Э.Н., Матвеев П.М., Софронов М.А. Крупные лесные пожары. М.: Наука, 1979. 198 с.
- [2] Валендик Э.Н. Районирование территории Сибири и Дальнего Востока по условиям возникновения крупных лесных пожаров // Методы и средства борьбы с лесными пожарами. М: ВНИИЛМ, 1986. С. 102–118.
- [3] Валендик Э.Н. Особенности распространения крупных лесных пожаров // Лесные пожары и борьба с ними. М: ВНИИЛМ, 1987. С. 28–42.
- [4] Главацкий Г.Д., Груманс В.М. Особенности тактики тушения лесных пожаров в многолесных районах Сибири // Вестник МГУЛ – Лесной Вестник, 2001. № 5. С. 23–37.
- [5] Груманс В.М. Особенности организации и тактики тушения крупных лесных пожаров (КЛП): На примере Красноярского Приангарья: дис. ... д-ра с.-х. наук. Москва: 06.03.03. 1999. 222 с.
- [6] Денисов А.Н. Методы, модели и алгоритмы поддержки управления пожарно-спасательными подразделениями при тушении пожаров: дис. д-ра с.-х. наук: 06.03.03. Москва. 2018. 406 с.
- [7] Доррер Г.А., Курбатский Н.П. Математические модели лесных пожаров: основные понятия, классификация, требования // Прогнозирование лесных пожаров. Красноярск: Изд-во Ин-та леса и древесины им. Сукачева СО АН СССР, 1978. С. 5–26.

- [8] Доррер Г.А., Ушанов С.В. Расчет оптимальных путей локализации лесных пожаров // Горение и пожары в лесу. Красноярск: Изд-во ИЛиД Со АН СССР, 1984. С. 72–74.
- [9] Коровин Г.М. Особенности расчета параметров лесных низовых пожаров // Сб. Науч.-иссл. работ по лесному хозяйству. М.: Гослес-бумиздат, 1969. Вып. 12. С. 244–262.
- [10] Коляда А.В. Оптимизация процесса тушения лесного пожара с использованием имитационного моделирования // Ученые записки Российского государственного социального университета, 2010. № 8 (84). С. 89–94.
- [11] Конев Э.В. К расчету сил и средств на остановку лесного пожара // ИВУЗ Лесной журнал, 1987. № 5. С. 24–29
- [12] Овсянников И.В. Расчет состава группы по тушению лесных пожаров // Лесное хозяйство, 1971. № 11. С. 61–63.
- [13] Овчинников Ф.М. Оперативная лесопирологическая схема для руководителя тушения пожара // Лесное хозяйство, 1992. № 12. С. 43–44.
- [14] Овчинников Ф.М. Разведка и составление плана тушения крупного лесного пожара // Лесное хозяйство. 1993. № 4. С. 44–45.
- [15] Овчинников Ф.М. Тактические расчеты при тушении лесного пожара. Техника безопасности // Лесное хозяйство. 1994. № 2. С. 38–41.
- [16] Повзик Я.С. Пожарная тактика. М.: ЗАО «Спецтехника», 2004. 416 с.
- [17] Таранцев А.А. Модель применения беспилотных летательных аппаратов в целях тушения крупных лесных пожаров в зоне применения наземных сил и средств // Вестник Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России. 2016. № 2. С. 21–27.
- [18] Телицын Г.П. Определение параметров крупных лесных пожаров при организации их тушения // Лесное хозяйство, 1980, № 7. С. 58–60.
- [19] Телицын Г.П. Организация тушения крупных лесных пожаров в условиях задымленности // Методы и средства борьбы с лесными пожарами. М.: ВНИИЛМ, 1985. С. 24–31.
- [20] Телицын Г.П. Рекомендации по борьбе с крупными лесными пожарами на Дальнем Востоке. Хабаровск: Изд-во ДальНИИЛХ, 1987. 48 с.
- [21] Яркин В.В. Организация управления совместными действиями подразделений различной ведомственной принадлежности при тушении крупных лесных и торфяных пожаров (на примере Ленинградской области) дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский институт Государственной противопожарной службы, 2015. 216 с.
- [22] Беккиев А.Ю. ЕСУ ТЗ: время делать следующий шаг. URL: <https://topwar.ru/11789-esu-tz-vremya-delat-sleduyuschiy-shag.html> (дата обращения 10.11.2021 г.).
- [23] Военное обозрение. Автоматизированная система управления войсками «Андромеда-Д». URL: <https://topwar.ru/32527-avtomatizirovannaya-sistema-upravleniya-voyskami-andromeda-d.html> (дата обращения 10.11.2021 г.).
- [24] Noonan-Wright E.K. et al. Developing the US Wildland Fire Decision Support System // Hindawi Publishing Corporation J. of Combustion, 2011, article ID 168473, pp. 1–14. DOI:10.1155/2011/168473
- [25] Приказ Минприроды России от 08.07.2014 № 313 (ред. от 16.02.2017) «Об утверждении Правил тушения лесных пожаров». URL: <https://docs.cntd.ru/document/420208466> (дата обращения 10.11.2021 г.).

Сведения об авторах

Коршунов Николай Александрович — канд. с.-х. наук, зав. отделом лесной пирологии и охраны лесов от пожаров, Центр развития приоритетных беспилотных технологий в лесной отрасли ФБУ ВНИИЛМ, letnab21@yandex.ru

Савченкова Вера Александровна — д-р с.-х. наук, доцент, гл. науч. сотр. отдела лесной пирологии и охраны лесов от пожаров, ФБУ ВНИИЛМ, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), v9651658826@yandex.ru

Перминов Анатолий Викторович — ст. науч. сотр. отдела лесной пирологии и охраны лесов от пожаров, Центр развития приоритетных беспилотных технологий в лесной отрасли ФБУ ВНИИЛМ, avperminov@mail.ru

Конюшенков Михаил Евгеньевич — зам. зав. отделом лесной пирологии и охраны лесов от пожаров, Центр развития приоритетных беспилотных технологий в лесной отрасли ФБУ ВНИИЛМ, 4x4drive@mail.ru

Поступила в редакцию 24.01.2022.

Одобрено после рецензирования 15.02.2022.

Принята к публикации 04.04.2022.

AUTOMATED CONTROL METHODOLOGY OF FIRE EXTINGUISHING MEANS SCIENTIFIC SUBSTANTIATION

N.A. Korshunov¹, V.A. Savchenkova^{1,2✉}, A.V. Perminov¹, M.E. Konyushenkov¹

¹All-Russian Scientific Research Institute for Forestry and Forestry Mechanization, 15, Institutskaya st., 141202, Pushkino, Moscow reg., Russia

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

v9651658826@yandex.ru

The issue of firefighters territorial dispersal along the perimeter of a forest fire during its extinguishing is considered. Justification of firefighters' coordination actions in a constantly changing external environment, taking into account the tasks facing the head of extinguishing a forest fire, was provided. The urgency of creating an automated control system for the forces and means of extinguishing a forest fire, as well as methods of controlling the forces and means of fire extinguishing in the elimination of large forest fires were substantiated. The main tasks underlying the methods of fire extinguishing forces management and technical solutions were given, such as the formation of situational awareness for participants in fire extinguishing and ensuring effective communication through the introduction of its new forms between participants in extinguishing. The implementation of this technique in the form of an automated control system was presented. This will be part of the subsystem of the ISDM-Rosleskhaz remote monitoring information system. The theoretical analysis of the main management tasks arising from the head of extinguishing a forest fire is carried out. Taking into account intellectual and technical developments, the rationale for the feasibility of integrating the subsystem into the existing remote monitoring information system of the Federal Forestry Agency is given. The significance of the work is identified, which consists in the development of algorithms for the automated formation of recommendations for making managerial decisions when organizing the extinguishing large forest fires, the introduction of electronic forms of communication when extinguishing a forest fire. Information links between participants of production processes are defined. An example of drawing up a scheme for extinguishing a forest fire is given. The procedure of actions of the head of extinguishing a forest fire and the heads of subordinate units, as well as a typical algorithm of their work, is presented. The blocks of the automated control system for each stage of its creation are indicated. The planned results of the study are presented.

Keywords: forest fire, automated system, methodology, extinguishing

Suggested citation: Korshunov N.A., Savchenkova V.A., Perminov A.V., Konyushenkov M.E. *Nauchnoe обоснование методики автоматизированного управления силами и средствами пожаротушения* [Automated control methodology of fire extinguishing means scientific substantiation]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 3, pp. 75–84. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-75-84

References

- [1] Valendik E.N., Matveyev P.M., Sofronov M.A. *Krupnye lesnye pozhary* [Large forest fires]. Moscow: Nauka, 1979, 198 p.
- [2] Valendik E.N. *Rayonirovaniye territorii Sibiri i Dalnego Vostoka po usloviyam vozniknoveniya krupnykh lesnykh pozharov* [Zoning of the territory of Siberia and the Far East according to the conditions of occurrence of large forest fires]. *Metody i sredstva borby s lesnymi pozharami* [Methods and means of combating forest fires], 1986, pp. 102–118.
- [3] Valendik E.N. *Osobennosti rasprostraneniya krupnykh lesnykh pozharov* [Features of the spread of large forest fires]. *Lesnye pozhary i borba s nimi* [Forest fires and their fight], 1987, pp. 28–42.
- [4] Glavatsky G.D., Grumans V.M. *Osobennosti taktiki tusheniya lesnykh pozharov v mnogolesnykh rayonakh Sibiri* [Features of forest fire fighting tactics in multi-forest areas of Siberia]. *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*, 2001, no. 5, pp. 23–37.
- [5] Grumans V.M. *Osobennosti organizatsii i taktiki tusheniya krupnykh lesnykh pozharov (KLP): na primere Krasnoyarskogo Priangarya* [Features of the organization and tactics of extinguishing large forest fires (CLIP): on the example of the Krasnoyarsk Angara region]. *Diss. Dr. Sci. (Agric.)*. Moscow, 1999, 222 p.
- [6] Denisov A.N. *Metody, modeli i algoritmy podderzhki upravleniya pozharo-spatel'nyimi podrazdeleniyami pri tushenii pozharov* [Methods, models and algorithms for supporting management of fire and rescue units in extinguishing fires]. *Diss. Dr. Sci. (Agric.)*. Moscow, 2018, 406 p.
- [7] Dorrer G.A., Kurbatsky N.P. *Matematicheskiye modeli lesnykh pozharov: osnovnye ponyatiya, klassifikatsiya, trebovaniya* [Mathematical models of forest fires: basic concepts, classification, requirements]. *Prognozirovaniye lesnykh pozharov* [Forecasting of forest fires], 1978, pp. 5–26.
- [8] Dorrer G.A., Ushanov S.V. *Raschet optimalnykh putey lokalizatsii lesnykh pozharov* [The calculation of the optimum ways of localization of forest fires]. *Gorenie i pozhary v lesu*. [Burning and fires in the forest]. Krasnoyarsk, 1984, pp. 72–74.
- [9] Korovin G.M. *Osobennosti rascheta parametrov lesnykh nizovykh pozharov* [Peculiarities of calculation of parameters of the forest ground fires]. *Sb. Nauchno-issledovat. rabot po lesnomu khozyaystvu* [Sat. Scientific research forestry work]. Moscow, 1969, no. 12, pp. 244–262.
- [10] Kolyada A.V. *Optimizatsiya protsessa tusheniya lesnogo pozhara s ispolzovaniyem imitatsionnogo modelirovaniya* [Optimization of the forest fire extinguishing process using simulation modeling]. *Uchenye zapiski Rossyskogo gosudarstvennogo sotsialnogo universiteta* [Scientific notes of the Russian State Social University], 2010, no. 8 (84), pp. 89–94.
- [11] Konev E.V. *K raschetu sil i sredstv na ostanovku lesnogo pozhara* [To calculate the forces and means to stop a forest fire]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 1987, no. 5, pp. 24–29.

- [12] Ovsyannikov I.V. *Raschet sostava gruppy po tusheniyu lesnykh pozharov* [Calculation of the composition of the forest fire extinguishing group]. *Lesnoye khozyaystvo* [Forestry], 1971, no. 11, pp. 61–63.
- [13] Ovchinnikov F.M. *Operativnaya lesopirologicheskaya schema dlya rukovoditelya tusheniya pozhara* [Operational forest fire prevention scheme for the fire extinguishing Manager]. *Lesnoye khozyaystvo* [Forestry], 1992, no. 12, pp. 43–44.
- [14] Ovchinnikov F.M. *Razvedka i sostav leniye plana tusheniya krupnogo lesnogo pozhara* [Exploration and preparation of a plan to extinguish a large forest fire]. *Lesnoye khozyaystvo* [Forestry], 1993, no. 4, pp. 44–45.
- [15] Ovchinnikov F.M. *Takticheskiye raschety pri tushenii lesnogo pozhara. Tekhnika bezopasnosti* [Tactical calculations when extinguishing a forest fire. Safety]. *Lesnoye khozyaystvo* [Forestry], 1994, no. 2, pp. 38–41.
- [16] Povzik Ya.S. *Pozharnaya taktika* [Fire tactics]. Moscow: ZAO «Spetstekhnika», 2004, 416 p.
- [17] Tarantsev A.A. *Model primeneniya bespilotnykh letatelnykh apparatov v tselyakh tusheniya krupnykh lesnykh pozharov v zone primeneniya nazemnykh sil i sredstv* [Model of the use of unmanned aerial vehicles to extinguish large forest fires in the zone of use of ground forces and means]. *Nauchno-analitichesky zhurnal vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii* [Scientific and analytical journal Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia], 2016, no 2, pp. 21–27.
- [18] Telitsyn G.P. *Opredeleniye parametrov krupnykh lesnykh pozharov pri organizatsii ikh tusheniya* [Determining the parameters of large forest fires in the organization of their extinguishing]. *Lesnoye khozyaystvo* [Forestry], 1980, no 7, pp. 58–60.
- [19] Telitsyn G.P. *Organizatsiya tusheniya krupnykh lesnykh pozharov v usloviyakh zadymlyonosti* [Organization of extinguishing large forest fires in smoke-filled conditions]. *Metody i sredstva borby s lesnymi pozharemi*. Moscow: VNIILM, 1985, pp. 24–31.
- [20] Telitsyn G.P. *Rekomendatsii po borbe s krupnymi lesnymi pozharemi na Dalnem Vostoke* [Recommendations for fighting large forest fires in the far East]. Khabarovsk: DalNIILKh, 1987, 48 p.
- [21] Yarkin V.V. *Organizatsiya upravleniya sovmestnymi deystviyami podrazdeleniy razlichnoy vedomstvennoy prinadlezhnosti pri tushenii krupnykh lesnykh i torfyanykh pozharov (na primere Leningradskoy oblasti)* [Organization of management of joint actions of divisions of various departmental affiliation in extinguishing large forest and peat fires (on the example of the Leningrad region)]. Diss. Dr. Sci. (Tech.). Petersburg: St. Petersburg State Fire Service Institute, 2015, 216 p.
- [22] Bekkiyev A.Yu. *YeSU TZ: vremya delat sleduyushchy shag* [Time to take the next step]. Available at: <https://topwar.ru/11789-esu-tz-vremya-delat-sleduyushchy-shag.html> (accessed 10.11.2021).
- [23] *Voyennoye obozreniye. Avtomatizirovannaya sistema upravleniya voyskami «Andromeda-D»* [Andromeda-D automated command and control system]. Available at: <https://topwar.ru/32527-avtomatizirovannaya-sistema-upravleniya-voyskami-andromeda-d.html> (accessed 10.11.2021).
- [24] Noonan-Wright E.K. Developing the US Wildland Fire Decision Support System. *Hindawi Publishing Corporation J. of Combustion*, 2011, article ID 168473, pp. 1–14. DOI:10.1155/2011/168473
- [25] *Prikaz Minprirody Rossii ot 08.07.2014 № 313 (red. ot 16.02.2017) «Ob utverzhenii Pravil tusheniya lesnykh pozharov»* [Order of the Ministry of Natural Resources of Russia «On the approval of the Rules for extinguishing forest fires»]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/420208466> (accessed 10.11.2021).

Authors' information

Korshunov Nikolay Aleksandrovich — Cand. Sci. (Agriculture), Head of the Department of Forest pyrology and forest fire protection, Center for Development of Priority Unmanned Technologies in Forestry of the Federal Budgetary Institution All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry, letnab21@yandex.ru

Savchenkova Vera Aleksandrovna — Dr. Sci. (Agriculture), Associate Professor, Chief Researcher of the Department of Forest pyrology and fire protection of forests at the Federal Budget Institution All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry, Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), v9651658826@yandex.ru

Perminov Anatoliy Viktorovich — Senior Researcher of the Department of forest pyrology and forest fire protection, Center for the Development of Priority Unmanned Technologies in the Forest Sector of the Federal Budgetary Institution All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry, avperminov@mail.ru

Konyushenkov Mikhail Evgen'evich — Deputy Head of the Department of Forest pyrology and forest fire protection, Center for the development of priority unmanned technologies in the forest industry of the Federal Budgetary Institution All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry, 4x4drive@mail.ru

Received 24.01.2022.

Approved after review 15.02.2022.

Accepted for publication 04.04.2022.

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

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ КЛОНАЛЬНОГО МИКРОРАЗМНОЖЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СОРТОВ *LONICERA CAERULEA* L.

Н.Д. Орлова✉, Е.Н. Раева-Богословская, О.И. Молканова

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

irosvet96@mail.ru

Рассмотрены вопросы оптимизации методики клонального микроразмножения ценных сортов *Lonicera caerulea* L. Установлено влияние различных компонентов питательной среды на всех этапах культивирования в условиях in vitro. Наибольший коэффициент размножения у сортов Диана и Югана отмечен при добавлении глюкозы в концентрации 40 г/л и добавлении сахарозы в концентрации 20 г/л. Определен наибольший процент укоренения у сортов Югана на питательной среде с индолмасляной кислотой (99 %) и у сорта Гжелка — с индолликусусной кислотой (96 %). Выявлено положительное влияние 200 мг/л хелата железа (Fe(III)-EDDHA) в составе питательной среды на процент корнеобразования сорта Диана — 81 %. Сделан вывод о том, что для сорта Югана (укореняемость 76 %) предпочтительно использование питательной среды с добавлением хелата железа Fe(III)-EDTA в концентрации 73,4 мг/л.

Ключевые слова: *Lonicera caerulea*, in vitro, питательная среда, источники углеводов, источники железа

Ссылка для цитирования: Орлова Н.Д., Раева-Богословская Е.Н., Молканова О.И. Совершенствование методики клонального микроразмножения перспективных сортов *Lonicera caerulea* L. // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 3. С. 85–92. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-85-92

Род *Lonicera* L. относится к семейству Caprifoliaceae Juss. и включает в себя около 200 видов, распространенных преимущественно в Северном полушарии в районах с умеренным климатом. Жимолость представляет собой листопадный кустарник высотой до 2,5 м со съедобными синими плодами [1].

Ареал произрастания жимолости простирается от Средней Азии до Дальнего Востока. Кустарник встречается в низовьях рек, на опушках хвойных лесов, на равнинах и в горной местности [2]. Растение неприхотливо к условиям роста, является одной из скороплодных и раннеплодоносящих культур. Период плодоношения может наступать на второй год после посадки и длится более 30 лет [3–5].

Для плодов жимолости характерно большое количество биологически активных веществ, макро- и микроэлементов. Процентное содержание на сырую массу ягод жимолости составляет 11,6...14,7 % сухих веществ, 2,9...5,2 % сахаров и 1,1...1,45 % пектиновых веществ. В биохимический состав ягод жимолости входят витамин С (до 27,4 мг/100 г), витамин Р (до 1956 мг/100 г), провитамин А (до 0,32 мг/100 г), витамин В₁ (до 3,8 мг/100 г), В₂ (до 3,8 мг/100 г), В₉ (до 10 мг/100 г) [6, 7]. Жимолость занимает первое место среди ягодных культур по содержанию магния (21,7 мг/100 г) и натрия (35,2 мг/100 г),

по наличию калия (70,3 мг/100 г) уступает лишь бруснике. Кроме того, в состав плодов входят: марганец, медь, кремний, йод, алюминий, стронций и барий [8, 9].

Плоды жимолости используют не только в свежем виде, но и в производстве таких пищевых продуктов, как соки, кисели, компоты, варенья, джемы. Из древесины жимолости изготавливают различные элементы декора [1]. Употребление ягод этой культуры снижает негативное воздействие ультрафиолетового излучения, уменьшает риски развития сахарного диабета и нейродегенеративных заболеваний, оказывает гепато- и кардиопротекторное, а также антибактериальное действия [10].

Спрос крупных садоводческих фирм и мелких фермерских хозяйств на плоды и посадочный материал этой культуры стремительно увеличивается. Производство посадочного материала жимолости такими вегетативными методами, как размножение отводками, зелеными и одревесневшими черенками, является малоэффективным и, в отличие от клонального микроразмножения, не позволяет получать большое количество выравненных саженцев за короткий промежуток времени.

Многие научные учреждения разрабатывали протоколы по клональному микроразмножению некоторых представителей рода *Lonicera* [11–14]. Однако, вследствие сортоспецифической реакции жимолости на различные факторы в условиях

**Ассортимент коллекции *L. caerulea* в генетическом банке in vitro
лаборатории биотехнологии растений ГБС РАН**

Assortment of the *L. caerulea* collection in the in vitro gene bank of the Plant Biotechnology Laboratory of the GBS RAS

Селекционный центр	Сорт
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук»	Длинноплодная, Гжелка
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина Российской академии наук	Московская 23, Фортуна
Федеральный Алтайский научный центр агробиотехнологий	Камчадалка, Бакчарский Великан, Золушка, Галочка
Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова	Волхова, Ленинградский Великан, Морена, Соловей, Лебедушка
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «ФНЦ им. И.В. Мичурина»	Антошка, Голубой Десерт, Ляня, Диана, Памяти Куминова, Княгиня, Вечный Зов
Областное государственное унитарное предприятие «Бакчарское»	Восторг, Гордость Бакчара, Югана
Университет Саскачевана (Канада)	Indigo Jem, Aurora, Boreal Beauty, Boreal Blizzard

in vitro, их не всегда можно применять для масштабного производства посадочного материала этой культуры [15].

Цель работы

Цель работы — совершенствование технологии клонального микроразмножения перспективных сортов *L. caerulea* для получения большого количества генетически однородных растений.

Материалы и методы

Исследования были проведены в лаборатории биотехнологии растений Главного ботанического сада им. Н.В. Цицина Российской академии наук (ГБС РАН) в 2019–2021 гг.

Объекты исследования: сорта Гжелка, Диана, Длинноплодная, Югана.

Исследования проводились с помощью общепринятых классических [16] и разработанных в лаборатории биотехнологии растений ГБС РАН [17] методов работы с культурами изолированных тканей и органов растений.

Опыты были проведены в трехкратной повторности, по десять эксплантов в каждой.

На этапе собственно микроразмножения применяли питательную среду MS (Murashige and Skoog) [18] с добавлением углеводов (сахарозы и глюкозы) в концентрации 20, 30, 40 г/л и 6-ВАР (6-benzylaminopurine) в концентрации 0,5 мг/л. В качестве контроля была использована питательная среда, содержащая 30 г/л сахарозы. Через 35 сут с момента высадки эксплантов проводили расчет коэффициента размножения.

Для изучения влияния различных ауксинов на корнеобразование регенерантов использовали питательные среды ½ MS с добавлением индолилуксусной кислоты (ИУК) и индолилмасляной кислоты (ИМК) в концентрации 1,0 мг/л. Через

45 сут с момента посадки рассчитывали процент укоренившихся регенерантов.

Для установления оптимального источника железа на этапе ризогенеза была использована питательная среда ½ MS с добавлением 73,4 мг/л хелата железа Fe(III)-EDTA в первом варианте опыта и с 200 мг/л хелата железа Fe(III)-EDDHA — во втором. Через 40 сут культивирования рассчитывали процент укоренившихся регенерантов.

Регенеранты культивировали при освещенности 1,5...2,0 Клк, 16-часовом фотопериоде и температуре 23...27 °С. В качестве эксплантов использовали участки микропобегов, содержащих 2–3 метамера.

Обработку полученных данных проводили с помощью общепринятых методов статистического анализа ANOVA [19] с использованием программного обеспечения Microsoft Office Excel 2010.

Результаты и обсуждение

В генетический банк растений in vitro лаборатории биотехнологии растений ГБС РАН включено более 1300 наименований растений, относящихся к различным видам и семействам. Жимолость синяя в коллекции представлена 30 сортами из различных селекционных центров (таблица).

Большое значение при разработке и оптимизации методик клонального микроразмножения растения имеют генетические особенности вида [20–22]. Все сорта, культивируемые в лаборатории биотехнологии растений, характеризуются различным коэффициентом размножения:

1) низким (3...5) — Aurora, Indigo Jem, Borealis Beauty, Borealis Blizzard;

2) средним (5...8) — Бакчарский Великан, Галочка, Камчадалка, Княгиня, Ленинградский Великан, Морена, Пташка;

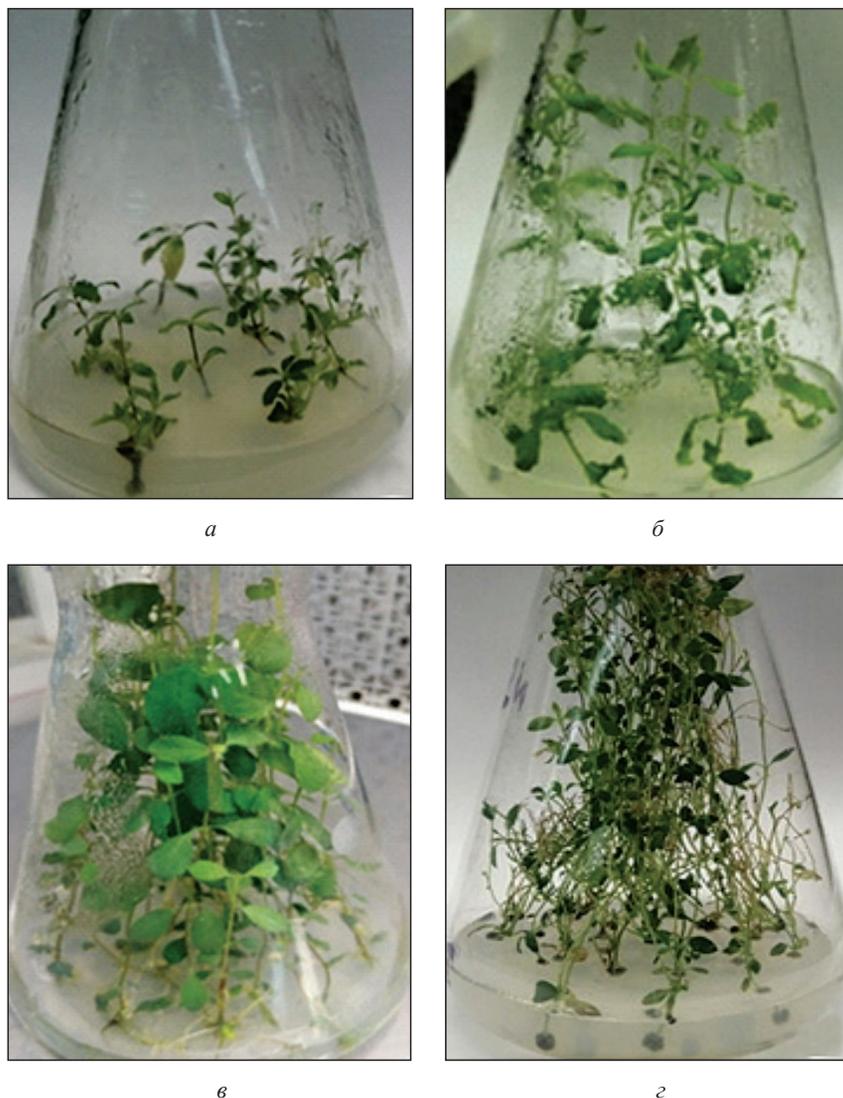


Рис. 1. Морфогенетический потенциал сортов жимолости синей в культуре *in vitro*: *a* — Borealis Blizzard; *б* — Камчадалка; *в* — Московская 23; *г* — Золушка
Fig. 1. Morphogenetic potential of blue honeysuckle varieties in *in vitro* culture: *a* — Borealis Blizzard; *б* — Kamchadalka; *в* — Moskovskaya 23; *г* — Cinderella

3) выше среднего (8...10) — Восторг, Гжелка, Голубой Десерт, Гордость Бакчара, Лебедушка, Леня, Московская 23, Соловей, Югана;

4) высоким (>10) — Волхова, Диана, Длинноплодная, Золушка.

Первые три группы сортов жимолости образовывали в культуре *in vitro* нормальные микропобеги, а четвертая группа — истонченные (рис. 1).

Этап собственно микроразмножения является важной стадией клонального микроразмножения, так как позволяет наиболее полно реализовать морфогенетический потенциал культуры.

На регенерацию представителей *L. caerulea* оказывали влияние источник углевода и его концентрация. У сорта Диана наблюдали максимальный коэффициент размножения на питательной среде, содержащей 30 г/л глюкозы (42), что пре-

вышало контрольный вариант (30 г/л сахарозы) почти в 2 раза, коэффициент размножения составил 24. В свою очередь, максимальный коэффициент размножения у сорта Югана был достигнут на питательной среде, содержащей 40 г/л сахарозы, и составил 45 (рис. 2).

Высокими коэффициентами размножения оба сорта характеризовались на питательных средах, дополненных 40 г/л глюкозы (Диана — 32, Югана — 26) и 20 г/л сахарозы (Диана — 31, Югана — 39).

Положительный эффект при замене в составе питательной среды сахарозы на глюкозу наблюдался у сорта Диана (коэффициент размножения 32). Сорт Югана характеризовался максимальным коэффициентом размножения на питательной среде, содержащей сахарозу (коэффициент размножения 39) (рис. 3).



Двухлетние саженцы в условиях открытого грунта, прошедшие полный цикл культивирования in vitro
Two-year-old seedlings in open ground conditions that have undergone a full cycle of in vitro cultivation

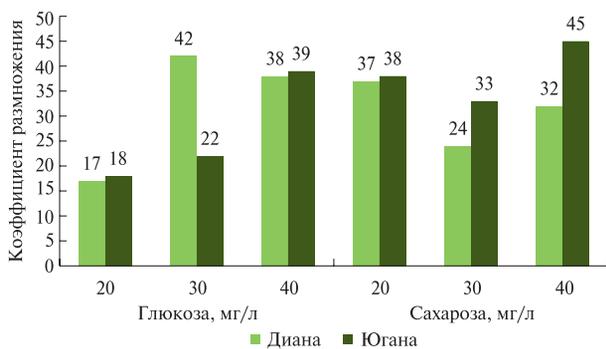


Рис. 2. Влияние сортовых особенностей, типа и концентрации углеводного питания на коэффициент размножения *L. caerulea* (НСР = 5,08)

Fig. 2. Influence of varietal features, type and concentration of carbohydrate nutrition on the reproduction rate of *L. caerulea* (НСР = 5,08)

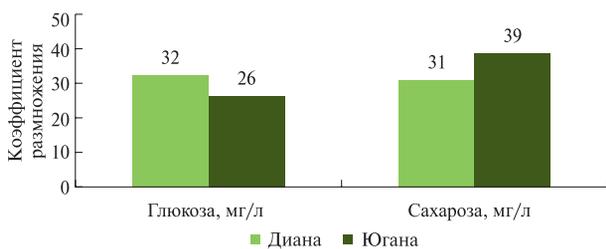


Рис. 3. Влияние сортовых особенностей и типа углеводного питания на коэффициент размножения *L. caerulea* (НСР = 4,17)

Fig. 3. Influence of varietal features and type of carbohydrate nutrition on the reproduction rate of *L. caerulea* (НСР = 4,17)

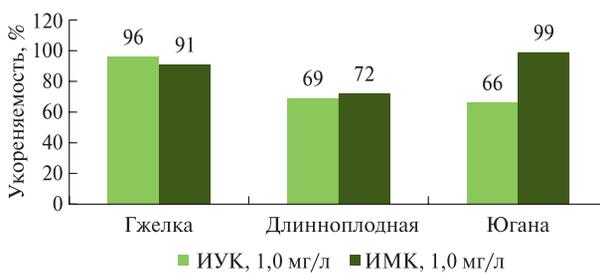


Рис. 4. Влияние типа ауксина на укоренение микропобегов *L. caerulea* сортов Гжелка, Длинноплодная, Югана

Fig. 4. Influence of the auxin type on the rooting of *L. caerulea* microshoots of Gzhehka, Long-fruited, and Yugana cultivars

Этап ризогенеза также является важной стадией клонального микроразмножения. Для эффективного укоренения в условиях in vitro большое значение имеет правильный выбор компонентов питательной среды.

При анализе влияния типа ауксина на корнеобразование сортов жимолости, существенное различие в укореняемости установили у сорта Югана: наибольший процент укоренения наблюдали при культивировании на питательной среде с ИМК (99%). Для сортов Гжелка и Длинноплодная существенной разницы при использовании регуляторов роста ИУК и ИМК не обнаружено (рис. 4, 5).

Для регенерации эксплантов важно содержание в питательной среде различных источников микроэлементов в доступной для растения форме. Одним из таких элементов является железо.

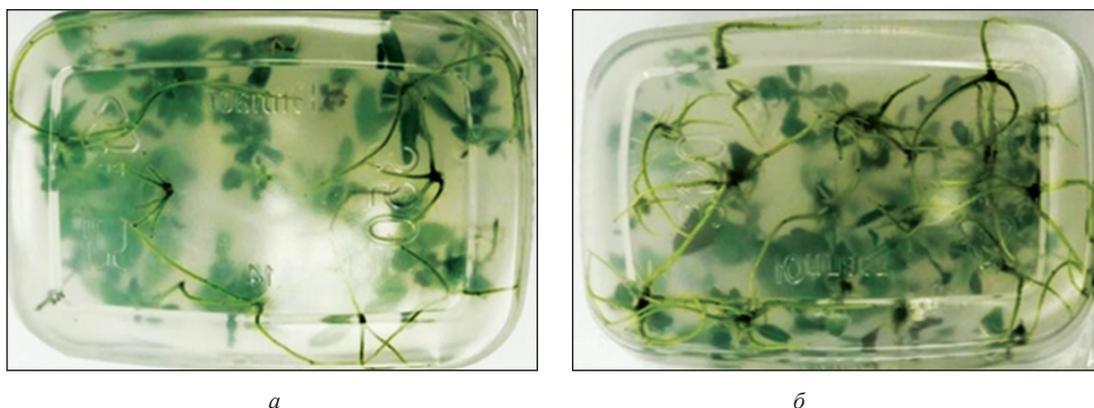


Рис. 5. Ризогенез in vitro сорта жимолости Югана на питательных средах с разными ауксинами: а — ИУК 1,0 мг/л; б — ИМК 1,0 мг/л
Fig. 5. In vitro rhizogenesis of the honeysuckle variety Yugana on nutrient media with different auxins: а — IAA 1,0 mg/l; б — IMC 1,0 mg/l

Оно принимает непосредственное участие в биосинтезе хлорофиллов, а также в процессах фотосинтеза, дыхания и в ферментативных реакциях [23]. Установлено, что хелаты обладают высокой биологической активностью, вследствие чего их используют для повышения усвояемости растениями других химических элементов [24, 25].

В ходе исследования выявлено, что применение питательной среды с добавлением хелата железа Fe(III)-EDDHA в концентрации 200 мг/л оказывало положительное влияние на динамику укоренения сортов жимолости (рис. 6).

Через 25 дней после пересадки микропобегов жимолости на питательную среду, содержащую Fe(III)-EDDHA, процент укоренения составил 62 %, через 40 дней — 76 %. Укореняемость оказалась на 15 % выше, чем у регенерантов, культивируемых на питательной среде с 73,4 мг/л хелата железа Fe(III)-EDTA.

В результате проведенных исследований установлены значительные различия в укореняемости сортов жимолости в зависимости от источника железа (рис. 7).

Применение питательной среды с добавлением хелата железа Fe(III)-EDDHA в концентрации 200 мг/л оказывало положительное влияние на укореняемость сорта Диана (81 %). У сорта Югана наибольший процент корнеобразования (76 %) выявлен при использовании хелата железа Fe(III)-EDTA в составе питательной среды.

Выводы

В ходе проведенного исследования была оптимизирована методика клонального микроразмножения сортов *L. caerulea*.

Для культивирования сорта Диана оптимальным углеводным компонентом питательной среды была глюкоза в концентрации 30 г/л (коэф-

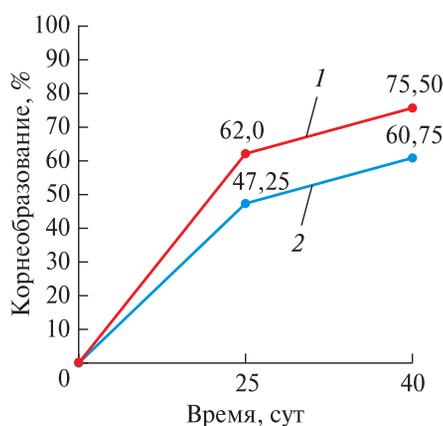


Рис. 6. Динамика укореняемости жимолости на питательных средах с различными источниками железа: 1 — Fe(III)-EDTA; 2 — Fe(III)-EDDHA
Fig. 6. Dynamics of honeysuckle rooting on nutrient media with various sources of iron: 1 — Fe(III)-EDTA; 2 — Fe(III)-EDDHA

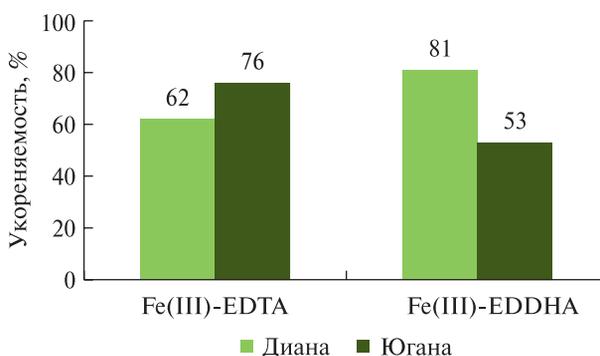


Рис. 7. Влияние источника железа в составе питательной среды на корнеобразование сортов жимолости
Fig. 7. Influence of the iron source in the composition of the nutrient medium on the root formation of honeysuckle varieties

фициент размножения составил 42), для сорта Югана — сахароза в концентрации 40 г/л (коэффициент размножения составил 45).

Наибольший процент укоренения наблюдали у сорта Югана при культивировании на питательной среде с ИМК (99 %). Для сорта Гжелка и Длинноплодная существенной разницы при использовании регуляторов роста ИУК и ИМК не обнаружено.

Питательная среда, содержащая 200 мг/л Fe(III)-EDDHA, способствовала увеличению процента укоренившихся регенерантов. Через 25 сут после пересадки микропобегов жимолости на питательную среду, содержащую Fe(III)-EDDHA, процент укоренения составил 62 %, через 40 дней — 76 %.

Применение питательной среды с добавлением хелата железа Fe(III)-EDDHA в концентрации 200 мг/л оказало положительное влияние на укореняемость сорта Диана (81 %). У сорта Югана наибольший процент корнеобразования (76 %) выявлен при использовании хелата железа Fe(III)-EDTA в составе питательной среды.

Список литературы

- [1] Сорокопудов В.Н., Куклина А.Г., Упадышев М.Т. Сорта съедобной жимолости: биология и основы культивирования: монография; под науч. ред. акад. РАН И. М. Куликова. М.: Изд-во ФГБНУ ВСТИСП, 2018. 160 с.
- [2] Хохлакова Л.А. Новые сорта жимолости как основа индустриальной технологии возделывания культуры // Современные проблемы возделывания сельскохозяйственных культур и пути повышения величины и качества урожая, 2006. № 7. С. 147–149.
- [3] Гидзюк И.К. Жимолость со съедобными плодами. Томск: Изд-во Томского университета, 1981. 168 с.
- [4] Thompson M., Chaovanalikit A. Preliminary observations on adaptation and nutraceutical values of blue honeysuckle (*Lonicera caerulea*) in Oregon // Acta Hort., 2003, no. 626, pp. 65–72 DOI: 10.17660/ActaHortic.2003.626.8
- [5] Пигуль М.Л., Шалкевич М.С. Продуктивность жимолости синей (*Lonicera caerulea* L.) // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии, 2013. № 2. С. 47–50.
- [6] Колесниченко М. Н., Козубаева Л. А. Химический состав и применение плодов жимолости // Современные проблемы техники и технологии пищевых производств: материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф., Барнаул, 29 ноября 2013. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2013. № 1(19). С. 20–21.
- [7] Jurikova T., Rop O., Mlcek J., Sochor J., Balla S., Szekeres L., Hegedusova A., Hubalek J., Adam V., Kizek R. Phenolic profile of edible honeysuckle berries (genus *Lonicera*) and their biological effects // Molecules, 2012, t. 17, no. 1, pp. 61–79. DOI: 10.3390/molecules17010061
- [8] Becker R., Szakiel A. Phytochemical characteristics and potential therapeutic properties of blue honeysuckle *Lonicera caerulea* L.(Caprifoliaceae) // J. of Herbal Medicine, 2019, t. 16, p. 100237. DOI: 10.1016/j.hermed.2018.10.002
- [9] Grobelna A., Kalisz S., Kieliszek M. Effect of processing methods and storage time on the content of bioactive compounds in blue honeysuckle berry purees // Agronomy, 2019, t. 9, no. 12, p. 860. DOI: 10.3390/agronomy9120860
- [10] Gołba M., Sokół-Łętowska A., Kucharska A. Health Properties and Composition of Honeysuckle Berry *Lonicera caerulea* L. // Molecules, 2012, no. 25, pp. 4467–4477. DOI: 10.3390/molecules25030749
- [11] Sedlák J., Paprštejn F. In vitro propagation of blue honeysuckle // Horticultural Science, 2007, t. 34, no. 4, p. 129. DOI:10.17221/1871-HORTSCI
- [12] Fira AI., Clapa D., Cristea V., Plopa C. In vitro propagation of *Lonicera kamtschatica* // Agriculture-Science and Practice, 2014, no. 1–2, pp. 89–90.
- [13] Dzedzic E. Propagation of blue honeysuckle (*Lonicera caerulea* var. *kamtschatica* Pojark.) in in vitro culture // J. of fruit and ornamental plant research, 2008, t. 16, pp. 93–100.
- [14] Krupa-Malkiewicz M., Ochmian I. Propagation of blue honeysuckle (*Lonicera caerulea* L.) in in vitro culture // J. of Basic and Applied Sciences, 2014, t. 10, pp. 164–169. DOI: 10.6000/1927-5129.2014.10.22
- [15] Debnath S.C. Strategies to propagate *Vaccinium* nuclear stocks for the Canadian berry industry // Canadian J. of Plant Science, 2007, t. 87, no. 4, pp. 911–922. DOI: 10.4141/P06-131
- [16] Бутенко Р.Г. Биология клеток высших растений in vitro и биотехнология на их основе. М.: ФБК-Пресс, 1999. 160 с.
- [17] Молканова О.И., Королева О.В., Стахеева Т.С., Крахмалева И.Л., Мелешук Е.А. Совершенствование технологии клонального микроразмножения ценных плодовых и ягодных культур для производственных условий // Достижения науки и техники АПК, 2018. Т. 32. № 9. DOI: 10.24411/0235-2451-2018-10915
- [18] Murashige T., Skoog F. A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures // Physiologia plantarum, 1962, t. 15, no. 3, pp. 473–497. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x
- [19] Лакин Г. Ф. Биометрия. М.: Высшая школа, 1980. 352 с.
- [20] Высоцкий В.А. Биотехнологические приемы в современном садоводстве // Садоводство и виноградарство, 2006. № 2. С. 2–3.
- [21] Митрофанова И.В. Методология биотехнологических исследований цветочно-декоративных культур. Симферополь: Ариал, 2018. 268 с.
- [22] Кутас Е.Н. Морфогенез интродуцированных сортов жимолости съедобной (*Lonicera edulis* Turcz. ex Freyn) в зависимости от состава питательных сред // Роль ботанических садов и дендрариев в сохранении, изучении и устойчивом использовании разнообразия растительного мира, 2017. С. 259–262.
- [23] Черевченко Т.М., Лаврентьева А.Н., Иванников А.Н. Биотехнология тропических и субтропических растений in vitro. Киев: Наукова думка, 2008. 560 с.
- [24] Álvarez-Fernández A., García-Marco S., Lucena J.J. Evaluation of synthetic iron (III)-chelates (EDDHA/Fe³⁺, EDDHMA/Fe³⁺ and the novel EDDHSA/Fe³⁺) to correct iron chlorosis // European J. of Agronomy, 2005, t. 22, no. 2, pp. 119–130. DOI: 10.1016/j.eja.2004.02.001
- [25] Zhang Y. Plant nutrition status, yield and quality of satsuma mandarin (*Citrus unshiu* Marc.) under soil application of Fe-EDDHA and combination with zinc and manganese in calcareous soil // Scientia Horticulturae, 2014, t. 174, pp. 46–53. DOI: 10.1016/j.scienta.2014.05.005

Сведения об авторах

Орлова Наталия Дмитриевна [✉] — мл. науч. сотр. лаборатории, ФГБУН Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН, irosvet96@mail.ru

Раева-Богословская Екатерина Николаевна — мл. науч. сотр. лаборатории, ФГБУН Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН, katyaraeva@ Rambler.ru

Молканова Ольга Ивановна — канд. с.-х. наук, вед. науч. сотр., зав. лабораторией, ФГБУН Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН, molkanova@mail.ru

Поступила в редакцию 19.10.2021.

Одобрено после рецензирования 16.02.2022.

Принята к публикации 04.04.2022.

CLONAL MICROPROPAGATION IMPROVEMENT TECHNIQUE OF *LONICERA CAERULEA* L. PROMISING CULTIVARS

N.D. Orlova [✉], **E.N. Raeva-Bogoslovskaya**, **O.I. Molkanova**

The N.V. Tsitsin Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences, 4, Botanicheskaya st., 127276, Moscow, Russia
irosvet96@mail.ru

The work is devoted to the optimization of clonal micropropagation method of the *Lonicera caerulea* L. cultivars. The influence of various components of the nutrient medium at all stages of cultivation in vitro has been established. The highest multiplication factor in varieties Diana and Yugana was noted with the addition of glucose at a concentration of 40 g/l and the addition of sucrose at a concentration of 20 g/l. When studying the effect of auxin type on the root formation of honeysuckle varieties, the highest percentage of rooting in Yugana varieties was observed on a nutrient medium with indolylbutyric acid (99 %), and in Gzhelka variety with indoleacetic acid (96 %). It was found that 200 mg/l of iron chelate (Fe(III)-EDDHA) in the composition of the nutrient medium had a positive effect on the percentage of root formation of the variety Diana 81 %. For the Yugana variety (rooting rate 76 %), it is better to use a nutrient medium with the addition of iron chelate Fe(III)-EDTA at a concentration of 73,4 mg/l.

Keywords: Blue honeysuckle, in vitro, nutrient medium, carbohydrate sources, iron sources, rooting

Suggested citation: Orlova N.D., Raeva-Bogoslovskaya E.N., Molkanova O.I. *Sovershenstvovanie metodiki klonal'nogo mikrorazmnozheniya perspektivnykh sortov Lonicera caerulea L.* [Clonal micropropagation improvement technique of *Lonicera Caerulea* L. promising cultivars]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 3, pp. 85–92. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-85-92

References

- [1] Sorokopudov V.N., Kuklina A.G., Upadyshev M.T. *Sorta s'edobnoy zhimolosti: biologiya i osnovy kul'tivirovaniya* [Varieties of blue honeysuckle: biology and the basics of cultivation]. Moscow: VSTISP, 2018, 160 p.
- [2] Khokhryakova L.A. *Novye sorta zhimolosti kak osnova Industrial'noy tekhnologii vozdeleyvaniya kul'tury* [New varieties of honeysuckle as a basis industrial technology of culture cultivation]. *Sovremennye problemy vozdeleyvaniya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur i puti povysheniya velichiny i kachestva urozhaya* [Modern problems of cultivation of agricultural crops and ways to increase the size and quality of the crop], 2006, no. 7, pp. 147–149.
- [3] Gidzyuk I.K. *Zhimolost' so s'edobnymi plodami* [Honeysuckle with edible fruits]. Tomsk: Izd-vo Tomskogo universiteta, 1981, 168 p.
- [4] Thompson M., Chaovanalikit A. Preliminary observations on adaptation and nutraceutical values of blue honeysuckle (*Lonicera caerulea*) in Oregon. *Acta Hort*, 2003, no. 626, pp. 65–72 DOI: 10.17660/ActaHortic.2003.626.8
- [5] Pigul' M.L., Shalkevich M.S. *Produktivnost' zhimolosti siney (Lonicera caeruleae L.)* [Productivity of blue honeysuckle (*Lonicera caerulea* L.)]. *Vestnik Belorusskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* [Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy], 2013, no. 2, pp. 47–50.
- [6] Kolesnichenko M.N., Kozubaeva L.A. *Khimicheskiy sostav i primeneniye plodov zhimolosti* [Chemical composition and application of honeysuckle fruits]. *Sovremennye problemy tekhniki i tekhnologii pishchevykh proizvodstv: Materialy XIV Mezhdunarodnoy nauchnoprakticheskoy konferentsii* [Modern problems of technology and technology of food production: Materials of the XIV International Scientific and Practical Conference], 2013, no. 1(19), pp. 20–21.
- [7] Jurikova T., Rop O., Mlcek J., Sochor J., Balla S., Szekeres L., Hegedusova A., Hubalek J., Adam V., Kizek R. Phenolic profile of edible honeysuckle berries (genus *Lonicera*) and their biological effects. *Molecules*, 2012, t. 17, no. 1, pp. 61–79. DOI: 10.3390/molecules17010061
- [8] Becker R., Szakiel A. Phytochemical characteristics and potential therapeutic properties of blue honeysuckle *Lonicera caerulea* L. (Caprifoliaceae). *J. of Herbal Medicine*, 2019, t. 16, p. 100237. DOI: 10.1016/j.hermed.2018.10.002

- [9] Grobelna A., Kalisz S., Kieliszek M. Effect of processing methods and storage time on the content of bioactive compounds in blue honeysuckle berry purees. *Agronomy*, 2019, t. 9, no. 12, p. 860. DOI: 10.3390/agronomy9120860
- [10] Gołba M., Sokół-Lętowska A., Kucharska A. Health Properties and Composition of Honeysuckle Berry *Lonicera caerulea* L.. *Molecules*, 2012, no. 25, pp. 4467–4477. DOI: 10.3390/molecules25030749
- [11] Sedlák J., Paprštejn F. In vitro propagation of blue honeysuckle. *Horticultural Science*, 2007, t. 34, no. 4, p. 129. DOI: 10.17221/1871-HORTSCI
- [12] Fira AI., Clapa D., Cristea V., Plopa C. In vitro propagation of *Lonicera kamschatica*. *Agriculture-Science and Practice*, 2014, no. 1–2, pp. 89–90.
- [13] Dziedzic E. Propagation of blue honeysuckle (*Lonicera caerulea* var. *kamschatica* Pojark.) in *in vitro* culture. *J. of fruit and ornamental plant research*, 2008, t. 16, pp. 93–100.
- [14] Krupa-Mańkiewicz M., Ochmian I. Propagation of blue honeysuckle (*Lonicera caerulea* L.) in *in vitro* culture. *J. of Basic and Applied Sciences*, 2014, t. 10, pp. 164–169. DOI: 10.6000/1927-5129.2014.10.22
- [15] Debnath S.C. Strategies to propagate *Vaccinium* nuclear stocks for the Canadian berry industry. *Canadian J. of Plant Science*, 2007, t. 87, no. 4, pp. 911–922. DOI: 10.4141/P06-131
- [16] Butenko R.G. *Biologiya kletok vysshikh rasteniy in vitro i biotekhnologiya na ikh osnove* [Biology of higher plant cells *in vitro* and biotechnology based on them]. Moscow: FBK-Press, 1999, 160 p.
- [17] Molkanova O.I., Koroleva O.V., Stakheeva T.S., Krakhmaleva I.L., Meleshchuk E.A. *Sovershenstvovanie tekhnologii klonal'nogo mikrorazmnozheniya tsennykh plodovykh i yagodnykh kul'tur dlya proizvodstvennykh usloviy* [Improving the technology of clonal micro-propagation of valuable fruit and berry crops for production condition]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* [Achievements of science and technology of the agro-industrial complex], 2018, t. 32, no. 9. DOI: 10.24411/0235-2451-2018-10915
- [18] Murashige T., Skoog F. A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. *Physiologia plantarum*, 1962, t. 15, no. 3, pp. 473–497. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x
- [19] Lakin G. F. *Biometriya* [Biometrics]. Moscow: Vysshaya shkola, 1980, 352 p.
- [20] Vysotskiy V.A. *Biotechnologicheskie priemy v sovremennom sadovodstve* [Biotechnological techniques in modern gardening]. *Sadovodstvo i vinogradarstvo* [Gardening and viticulture], 2006, no. 2, pp. 2–3.
- [21] Mitrofanova I.V. *Metodologiya biotekhnologicheskikh issledovaniy tsvetchno-dekorativnykh kul'tur* [Methodology of biotechnological research of flower and ornamental crops]. Simferopol': Arial, 2018, 268 p.
- [22] Kutas E.N. *Morfogenez introdutsirovannykh sortov zhimolosti s'edobnoy (Lonicera edulis Turcz. ex Freyn) v zavisimosti ot sostava pitatel'nykh sred* [Morphogenesis of introduced varieties of blue honeysuckle (*Lonicera edulis* Turcz. ex Freyn) depending on the composition of nutrient media]. *Rol' botanicheskikh sadov i dendrariy v sokhraneni, izuchenii i ustoychivom ispol'zovanii raznoobraziya rastitel'nogo mira* [The role of botanical gardens and arboreta in the conservation, study and sustainable use of the diversity of the plant world], 2017, pp. 259–262.
- [23] Cherevchenko T.M., Lavrent'eva A.N., Ivannikov A.N. *Biotechnologiya tropicheskikh i subtropicheskikh rasteniy in vitro* [Biotechnology of tropical and subtropical plants *in vitro*]. Kiev: Naukova dumka, 2008, 560 p.
- [24] Álvarez-Fernández A., García-Marco S., Lucena J.J. Evaluation of synthetic iron (III)-chelates (EDDHA/Fe³⁺, EDDHMA/Fe³⁺ and the novel EDDHSA/Fe³⁺) to correct iron chlorosis. *European J. of Agronomy*, 2005, t. 22, no. 2, pp. 119–130. DOI: 10.1016/j.eja.2004.02.001
- [25] Zhang Y. Plant nutrition status, yield and quality of satsuma mandarin (*Citrus unshiu* Marc.) under soil application of Fe-EDDHA and combination with zinc and manganese in calcareous soil. *Scientia Horticulturae*, 2014, t. 174, pp. 46–53. DOI: 10.1016/j.scienta.2014.05.005

Authors' information

Orlova Natalia Dmitrievna✉ — Junior Researcher of the Laboratory, Fsbis Main Botanical Garden Named after N.V. Tsitsin, irosvet96@mail.ru

Raeva-Bogoslovskaya Ekaterina Nikolaevna — Junior Researcher of the Laboratory, Fsbis Main Botanical Garden Named after N.V. Tsitsin, katyaraeva@rambler.ru

Molkanova Ol'ga Ivanovna — Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Head of the Laboratory, Fsbis Main Botanical Garden Named after N.V. Tsitsin, molkanova@mail.ru

Received 19.10.2021.

Approved after review 16.02.2022.

Accepted for publication 04.04.2022.

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

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ КОЛЛЕКЦИИ СОРТОВ РОДА *CLEMATIS* L. В СОСТАВЕ СОВРЕМЕННОГО КОЛЛЕКЦИОННОГО ФОНДА ЛАБОРАТОРИИ ДЕКОРАТИВНЫХ РАСТЕНИЙ ГЛАВНОГО БОТАНИЧЕСКОГО САДА РАН

Н.Н. Трубина, Н.А. Мамаева, Ю.А. Хохлачева✉

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

jusic-la@yandex.ru

Приведены результаты анализа структуры современной коллекции сортов рода *Clematis* L. лаборатории декоративных растений ГБС РАН. Установлены особенности распределения культиваров по принадлежности к группам обрезки. Охарактеризовано распределение сортов в зависимости от страны их происхождения. Выявлено доминирование СССР и Великобритании, являвшихся в разное время лидерами мировой селекции культуры. Изучено распределение сортов по периодам их создания: от культиваров, полученных в 1850–1860 гг. до селекционных достижений XXI в., что подтверждает наличие в составе коллекции широкого морфологического разнообразия культивируемых представителей рода *Clematis* L. Предложен вариант размещения части сортов на коллекционно-экспозиционном участке лаборатории декоративных растений ГБС РАН, позволяющий, кроме научной работы, при необходимости, реализовывать образовательные и просветительские проекты.

Ключевые слова: сорта рода *Clematis* L., коллекция, история селекции, размещение сортов

Ссылка для цитирования: Трубина Н.Н., Мамаева Н.А., Хохлачева Ю.А. Анализ структуры коллекции сортов рода *Clematis* L. в составе современного коллекционного фонда лаборатории декоративных растений Главного ботанического сада РАН // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 3. С. 93–104.
DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-93-104

Представителей рода *Clematis* L. в условиях культуры изучают около 500 лет, а история их целенаправленной селекции составляет около 180 лет [1]. Исходя из этого, считаем целесообразным рассмотреть структуру современных коллекций сортов рода *Clematis* L. в аспекте исторического развития мировой селекции этой культуры.

Первые документально зафиксированные сведения об интродукции представителей рода *Clematis* L. датированы XVI в. Одним из примеров успешной интродукции является введение в культуру *C. viticella* L., привезенного в Англию в 1569 г. из Испании. Представителей рода *Clematis* L. интродуцировали в Англию также из других стран Южной и Юго-Восточной Европы [2]. После 1569 г. целенаправленные флористические экспедиции были организованы Швецией и Нидерландами. Например, в 1776 г. шведский ботаник С.Р. Thunberg интродуцировал *C. florida* Thunb., а в 1836 г. нидерландский исследователь Ph.Fr. von Siebold — *C. lanuginosa* Lindl. и *C. patens* Moench et Decne. [3]. Это обусловило создание коллекций на основе растительного материала, успешно прошедшего интродукционные испытания, что, в свою очередь,

формировало базу для развития селекционной работы, способствуя накоплению перспективного исходного материала при создании популяций для отбора.

Цель работы

Цель работы — оценка количественного и качественного состава современной коллекции сортов рода *Clematis* L. лаборатории декоративных растений ГБС РАН и разработка варианта размещения части культиваров на территории коллекционно-экспозиционного участка с учетом их потенциального использования в образовательных и просветительских мероприятиях.

Материалы и методы

При формировании, поддержании и расширении компонентного состава коллекционного фонда представителей рода *Clematis* L. лабораторией декоративных растений ГБС РАН были использованы преимущественно классические методы интродукции [4–6]. Коллекцию собирали по традиционным принципам [7], направленным на создание коллекций, демонстрирующих характерные особенности сортифта конкретной декоративной культуры, в частности:

1) отражение всех существующих садовых классификаций культуры;

Количественная характеристика коллекций сортов рода *Clematis* L. в составе коллекционных фондов некоторых учреждений ботанического профиля (по данным официальных сайтов соответствующих ботанических организаций)

Quantitative characteristic of collections of *Clematis* L. varieties in the collection funds of some botanical institutions (according to the official websites of the relevant botanical organizations)

Учреждение	Количество сортов в коллекции (шт.)
Волгоградский региональный ботанический сад	292
Главный ботанический сад РАН	167
Ботанический сад-институт Уральского отделения РАН	88
Центральный Сибирский ботанический сад Сибирского отделения РАН	28
Ботанический сад-институт Уфимского научного центра РАН	26
Ботанический сад Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского	24
Ботанический сад-институт Дальневосточного отделения РАН	21
Ботанический сад Самарского государственного университета	3

2) наличие выборки сортов, представляющих основные селекционные центры культуры и достижения наиболее известных селекционеров;

3) сбор ретро-сортов и ретро-форм;

4) наличие выборки национальных селекционных достижений;

5) отбор культиваров, демонстрирующих микроэволюционные изменения культуры;

6) включение в состав коллекции уникальных, редких сортов и сортов-шедевров.

Мониторинг наличия и состава коллекций сортов рода *Clematis* L. в коллекционных фондах организаций ботанического профиля Российской Федерации осуществлен с использованием открытых источников информации [8–13].

Разработка варианта размещения части коллекционного фонда представителей рода *Clematis* L. лаборатории декоративных растений ГБС РАН выполнена на основе общепринятых при проектировании ландшафтных композиций способов и приемов [14] с использованием специализированной компьютерной программы AutoCAD.

Результаты исследования

Коллекция сортов рода *Clematis* L. существует в составе коллекционного фонда ГБС РАН около 70 лет [9] и ее, на наш взгляд, можно считать крупной моноколлекцией (табл. 1).

Одной из основных хозяйственно ценных характеристик рода *Clematis* L., определяющих потенциальную перспективность вида/сорта для интродукционного изучения, а в дальнейшем и для использования в озеленении территорий различного назначения, является их принадлежность к той или иной группе обрезки. С учетом этой принадлежности характеризуют зимостойкость растений и определяют их агротехнические особенности [16–18].

В составе коллекции сортов рода *Clematis* L. лаборатории декоративных растений ГБС РАН представлены все существующие группы обрезки, однако доминируют II и III (рис. 1). В состав коллекционного фонда также входят сорта II группы, которые обильно цветут при низкой обрезке побегов аналогично III группе (например, сорта ‘The President’, ‘Utopia’, ‘Solidarnosc’).

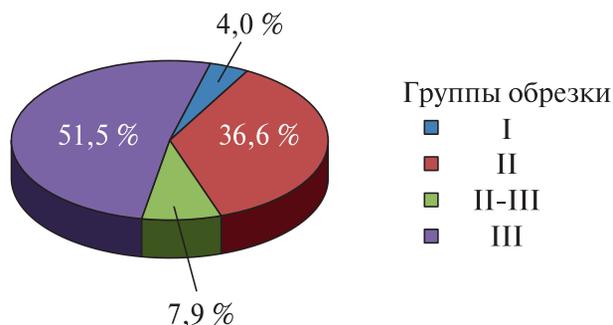


Рис. 1. Распределение сортов рода *Clematis* L. в составе коллекции ГБС РАН по группам обрезки (процент от общего числа сортов в составе коллекции)

Fig. 1. Distribution of varieties of the genus *Clematis* L. in the collection of the MBG RAS by pruning groups (percentage of the total number of varieties in the collection)

Анализируя состав коллекции по указанной выше характеристике, потенциально наиболее перспективными для интродукционного изучения (согласно результатам интродукционного прогноза), а также для возможного дальнейшего использования в озеленении городских территорий можно считать сорта рода *Clematis* L., входящие в III группу (с необходимой обрезкой надземной массы до 15...20 см и легким укрытием).

В состав коллекционного фонда лаборатории декоративных растений ГБС РАН в соответствии с географической локализацией центров развития

селекционной работы с представителями рода *Clematis* L. входят сорта, созданные в трех частях света: Европе, Азии, Америке. Это является закономерным следствием развития флористических и интродукционных исследований и селекционной работы [19, 20]. Наибольшее количество центров развития селекционной работы находится в странах Европы — Великобритании, Франции, Германии, Польше, Нидерландах, Швеции и Дании (рис. 2).

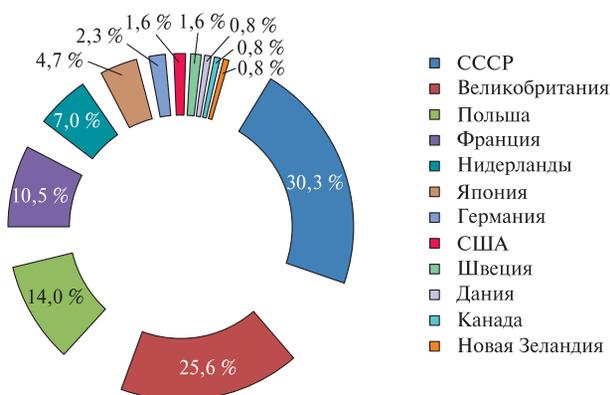


Рис. 2. Распределение сортов рода *Clematis* L. в коллекции ГБС РАН в зависимости от страны их происхождения (процент от общего числа сортов в составе коллекции)

Fig. 2. Distribution of varieties of the genus *Clematis* L. in the collection of the MBG RAS, depending on their country of origin (percentage of the total number of varieties in the collection)

Исторически европейские государства наиболее активно осуществляли экспедиционные поездки, формируя коллекции, в дальнейшем использованные для селекционной работы.

По количественным показателям (см. рис. 2) в составе коллекции сортов рода *Clematis* L. лаборатории декоративных растений ГБС РАН, согласно действующей стратегии развития коллекционного фонда, доминируют две страны — СССР и Великобритания, которые в различные периоды времени были лидерами мировой селекции клематисов. Это объективно отражает соответствующий период исторического развития представителей рода *Clematis* L. и особенности политики стран относительно этой декоративной культуры [2, 21].

В начале XIX в. в Англии впервые была осуществлена искусственная гибридизация. Таким образом, началась селекция клематисов на научной основе. Страна в течение длительного периода времени поддерживала приоритет в отношении развития этой культуры, который сохранен до настоящего времени. Кроме того, в Англии при смене оригинаторов традиционно сохраняется преемственность. Это можно отметить не только по отношению к клематисам, но и ко многим

другим декоративным растениям [22, 23]. Подобный подход позволяет сохранять в дальнейшем и эффективно использовать наиболее ценный селекционный материал, что обеспечивает быстрые прогрессивные изменения в селекции культуры.

В СССР после завершения Второй мировой войны был реализован иной подход: оперативно мобилизован научно-технический потенциал, восстановлены международные связи, позволившие восполнить объективно утраченный ассортимент и интродуцировать современные сорта, селекция организована по локально-зональному принципу [24]. В совокупности это обеспечило стране лидирующие позиции в мировой селекции культуры на достаточно длительный промежуток времени.

В соответствии с историческим контекстом в составе коллекции лаборатории декоративных растений ГБС РАН представлены селекционные достижения и других стран с развитой селекцией представителей рассматриваемого рода — Польши, Франции, Нидерландов, Японии, Германии, Канады, США и Швеции (см. рис. 2). По окончании Второй мировой войны одним из наиболее активных центров селекции представителей рода *Clematis* L. в Европе была Швеция. Сорта, созданные в этой стране, и в настоящее время представляют потенциальный интерес для их интродукции в северные области Российской Федерации [25]. На высокий уровень в конце 1980-х годов вышла селекционная работа с этой культурой в Нидерландах, что обусловлено давними традициями в области цветоводства, характерными для этой страны. Работа с представителями рода *Clematis* L. организована на основе комплексного развития нескольких направлений: интродукции, селекции и распространения новых сортов [2]. Международный центр по регистрации новых сортов рода *Clematis* L. в настоящее время находится на территории Нидерландов. Хорошо развита их селекция и в Польше, где создано много широко известных сортов [21]. В других странах Европы селекционная работа отличается меньшей продуктивностью. Однако внимания, безусловно, заслуживают селекционные достижения Германии и особенно Франции, где созданы высоко декоративные культивары [26].

На Северо-Американском континенте селекция сортов рода *Clematis* L. традиционно представлена в двух крупных странах: США и Канаде. Однако значительного развития, по объективным причинам, она не получила [1]. В США целенаправленно развивать селекцию этой культуры начали позже, чем в Европе, поэтому не было возможности быстро получить хорошие результаты. В Канаде значительные сложности для селекционной работы с представителями этого

Т а б л и ц а 2

Представленность стран с наличием селекции клематисов и работающих на их территории селекционеров (в составе современной коллекции ГБС РАН)

Representation of countries with clematis breeding and breeders working on their territory (as part of the modern collection of the MBG RAS)

Страна	Оригинаторы и селекционные центры
СССР	А.Н. Волосенко-Валенис, М.А. Бескаравайная, М.И. Орлов, М.Ф. Шаронова, U. Kivistik, L. Bakevicius
Великобритания	G. Jackman and Son, Thomas Cripps and Son, Fisk's Clematis Nursery, R. J. Evison, El. Jones, F. Meecham, E. Markham, Vince and Sylvia, Denny, Ch. Noble, K. Pyne, J. Fisk, P. Picton, J. B. Rowe, W. Pennell, M. Hunt, J. Treasure, B. Fretwell, F. Watkinson
Польша	St. Franczak, Sz. Marczynski, W. Noll
Франция	J. Thuilleaux, F. J. Grootendorst, Fr. Morel, D. Freres, A. Girault, Baron Veillard
Нидерланды	J. Bouter and Zoon, H. van Haasterd, H. Jacobus, M. Kuijff, W. Snoeijer, J. van Zoest bv
Япония	K. Sugimoto, S. Arai, E. Kubota, R. Ozawa, H. Hayakawa
Германия	L. Späth, W. Straver
США	Ar. H. Steffen
Швеция	M. Johnsson
Дания	F. Hansen

рода обусловлены главным образом климатическими условиями, в частности — температурным режимом. Вследствие этого получить сорта с достаточным для условий страны уровнем морозостойкости оказалось чрезвычайно сложно. При этом наиболее эффективным подходом при создании популяций для отбора перспективных селекционных номеров можно считать применение метода межвидовой гибридизации, хотя и он сопряжен с комплексом известных сложностей.

В Азии ведущие позиции в селекции и интродукции представителей рода *Clematis* L. принадлежат Японии. В конце 1980-х годов в этой стране уже было создано более 200 сортов этой культуры, что во многом обусловлено составом природной флоры, где были найдены ресурсы, ценные для интродукции и селекции представителей рода *Clematis* L. [27].

В соответствии с одним из классических принципов формирования качественного состава крупных коллекций монокультур в лаборатории декоративных растений ГБС РАН представлены сорта рода *Clematis* L. известных селекционеров

и селекционные достижения различных центров селекции (в том числе частных селекционных фирм и питомников) (табл. 2).

Исключение составляет СССР, где селекционеры, как правило, работали на базе довольно крупных государственных учреждений (научно-исследовательских институтов, ботанических садов и т. п.), поэтому в структуре коллекции лаборатории декоративных растений ГБС РАН страна представлена небольшим числом селекционеров (6) (см. табл. 2), но большой долей сортов (30,3 %) (см. рис. 2). Так, А.Н. Волосенко-Валенис, работавший в Никитском ботаническом саду, был одним из первых в стране селекционеров клематисов. Позднее на базе Никитского ботанического сада эффективно занимались селекционной работой Е.А. Донюшкина и М.А. Бескаравайная. Авторству М.А. Бескаравайной принадлежит большое количество селекционных достижений. Значительная часть выведенных ею сортов сохранилась и входит в состав многих коллекций [21, 28]. В Центральном республиканском ботаническом саду АН УССР М.И. Орлов и Ю.В. Войченко занимались селекцией сортов рода *Clematis* L., устойчивых к увяданию, вызванному патогенной микрофлорой, активно используя метод межвидовой гибридизации [3]. Большой вклад в развитие селекции клематисов в СССР внесли селекционеры республик Прибалтики: в Эстонии — А. Vaigla (первый в республике селекционер этой культуры), U. Kivistik, E. Pranno, G. Toovere; в Латвии — М. Taurite, J. Ruplens, V.E. Riekstinya; в Литве — L. Bakevicius, I. Norgel, A. Самбарос [2, 9, 29]. Среди советских селекционеров также следует отметить продуктивно работавшую М.Ф. Шаронову. Сорта, выведенные ею, широко известны и культивируются до сих пор [30].

На разных этапах селекции представителей рода *Clematis* L. традиционно успешно работали британские, а точнее, английские селекционеры [31]. В начальный период этой культурой занимался G. Jackman (владелец питомника G. Jackman and Son), наиболее известный специалист по клематисам. Он создал 38 сортов, что составило 47 % существовавшего на тот период ассортимента представителей этого рода. Селекцией занимались и такие крупные селекционеры, как Ch. Noble и V. Crips (Thomas Cripps and Son), затем E. Markham, внесший большой вклад в развитие культуры. Представитель шестого поколения владельцев питомника Линкольна — W. Pennell — создал большое количество широко известных сортов с использованием естественной, а затем и искусственной гибридизации. На базе другого питомника успешно работали J. Treasure и R.J. Evison. Со второй половины XX в. наиболее авторитетным специалистом был

J. Fisk (Fisk's Clematis Nursery), значительный вклад в развитие культуры внес В. Fretwell. Поэтому наибольшим числом оригинаторов (18) (см. табл. 2) и, соответственно, большой долей сортов (25,6 %) (см. рис. 2) в составе коллекции лаборатории декоративных растений ГБС РАН представлена Великобритания.

Селекционные достижения Швеции представлены в коллекции лаборатории декоративных растений ГБС РАН сортами наиболее известного селекционера М. Johnson [25].

Отметим достижения польской селекции. Это прежде всего известные во всем мире сорта, выведенные выдающимся селекционером W. Noll. Однако многие из них полностью утрачены. Существенный вклад в развитие ассортимента представителей рода *Clematis* L. принадлежит также селекционеру St. Franczak, активно работавшему в области селекции и размножения этой культуры, и Sz. Marczynski [19, 26, 28].

В эволюционном развитии культивируемых форм представителей рода *Clematis* L., безусловно, значительная роль принадлежит японским селекционерам, работавшим на базе крупных коллекций, включающих в себя как европейские, так и местные сорта, а также природные виды и различные формы естественного и искусственного происхождения [21, 32].

Важной характеристикой современного коллекционного фонда рода *Clematis* L. лаборатории декоративных растений ГБС РАН является, то, что в его составе сохранена тенденция формирования структуры, позволяющая изучать и при необходимости демонстрировать (используя ресурсы экспозиций) микроэволюционные изменения культуры за длительный период (около 150 лет). Согласно современным тенденциям, связанным с расширением функций ботанических садов [33, 34], это составляет одну из основных ценностей коллекционного фонда. Таким образом, в его составе целенаправленно поддерживаются сорта, представляющие различные исторические периоды развития культуры (рис. 3).

Выборка включает в себя широкое разнообразие сортов: от созданных на начальных этапах развития селекции (в 1850–1860-х гг.) и ставших в настоящее время историческими ('Jackmanii', 'Jeanne d'Arc', 'Madame van Houtte', 'Star of India', 'Victoria') до селекционных достижений XXI в. ('Lech Walesa', 'Utopia', 'My Angel', 'Barbara', 'Dark Eyes', 'East River', 'Mississippi River', 'Princess Kate' и 'Queen Mother').

При этом, на наш взгляд, объективно представлено доминирование культиваров, созданных во второй половине XX в. Это, например, 'Bees Jubilee', 'Fujimusume', 'Hakuookan', 'Snow Queen', 'Vyvyan Pennell', 'Carmencita' (1950–1959 гг.),

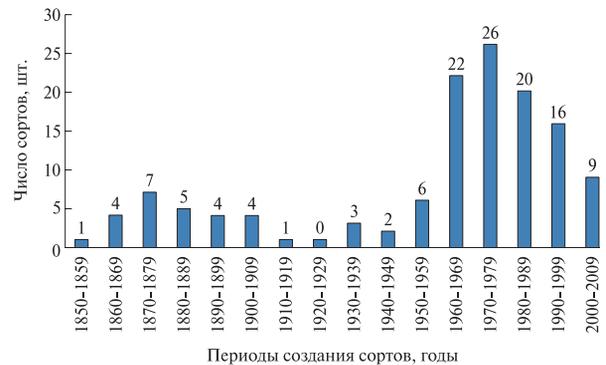


Рис. 3. Распределение сортов рода *Clematis* L. в составе коллекции лаборатории декоративных растений ГБС РАН по периодам создания

Fig. 3. Distribution of varieties of the genus *Clematis* L. in the collection of the Laboratory of Ornamental Plants of the Russian Academy of Sciences by the periods of creation



'East River'



'Jeanne d'Arc'

'General Sikorski', 'Etoile de Malicorne', 'Margaret Hunt', 'Балерина', 'Надежда', 'Аленушка', 'Лютер Бербанк', 'Синее пламя', 'Юбилейный-70' (1960–1969 гг.), 'Baltyk', 'Matka Siedliska', 'Nelly Moser', 'Bagatelle', 'Niobe', 'Бал цветов', 'Каменный цветок', 'Серенада Крыма', 'Прибалтика',



‘Jan Pawel II’



‘Polish Spirit’



‘Ville de Lyon’



‘Лютер Бербанк’



‘Princess Kate’



‘Серебряный ручеек’



‘Utopia’

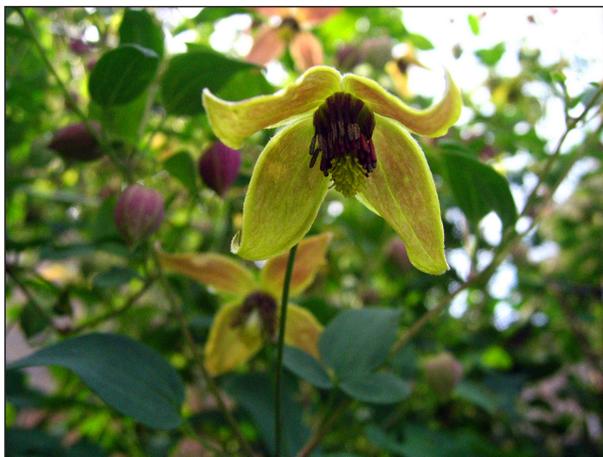


‘Lech Walesa’

‘Серебряный ручеек’, ‘Ялтинский этюд’ (1970–1979 гг.), ‘Jan Pawel II’, ‘Louise Rowe’, ‘Matka Urszula Ledochowska’, ‘Duchess of Edinburgh’, ‘Multi Blue’, ‘Polish Spirit’, ‘Princess Diana’ (1980–1989 гг.), ‘Pink Flamingo’, ‘Frau Mikiko’, ‘Julka’, ‘Sympatia’, ‘Golden Tiara’, ‘Avant-Garde’, ‘Blue Angel’, ‘Little Butterfly’ (1990–1999 гг.). Однако для наиболее полной реализации этого подхода желательно введение в состав коллекции сортов — представителей текущего этапа селекции (созданных за последние 3...5 лет).

На базе современной коллекции рассматриваемого рода в лаборатории декоративных растений ГБС РАН также успешно реализован принцип, направленный на создание коллекций, отражающих характерные особенности сортимента конкретной декоративной культуры, что связано с культивированием в ее составе исторических и ретро-сорт, уникальных и редких культиваров, а также сортов-шедевров и т. п. [7]. Так, в состав коллекции входит созданный в Англии первый, упомянутый ранее, сорт — ‘Jackmanii’ (1858), полученный с использованием искусственной гибридизации. Этот уникальный культивар,

сохранившийся до настоящего времени, в течение длительного временного периода активно и успешно использовался в гибридизации. Также представлены очень старые (созданные в XIX в.), входящие в современные коллекции сорта: ‘Star of India’ (1867), ‘Victoria’ (1867), ‘The President’ (1876), ‘Nelly Moser’ (1897), ‘Purpurea Plena Elegans’ (1899), ‘Comtesse de Bouchard’ (1900), ‘Huldine’ (1900), ‘Madame Julia Correvon’ (1900), ‘Madame Baron Veillard’ (1885) и т. д. Вероятно они характеризуются высоким адаптационным потенциалом. По нашему мнению, в настоящее время ценными правомерно также считать сорта, созданные в различных странах и ставшие генетической основой современного мирового сортимента культуры — ‘Madame van Houtte’ (1867, Англия), ‘Jeanne d’Arc’ (1869, Франция), ‘Mrs. George Jackman’ (1873, Англия), ‘Durandii’ (1874, Франция), ‘Belle of Woking’ (1875, Англия), ‘Daniel Deronda’ (1882, Англия), ‘Gipsy Queen’ (1877, Англия), ‘Ville de Lyon’ (1899, Франция), ‘Hagley Hybrid’ (1945, Англия), ‘Лютер Бербанк’ (1962, СССР), ‘Бал цветов’ (1972, СССР), ‘Бирюзинка’ (1971, СССР), ‘Серебряный ручеек’ (1972, СССР).



‘My Angel’



‘Frau Mikiko’



‘Бал цветов’



‘Аленушка’

В составе современного коллекционного фонда представителей рода *Clematis* L. лаборатории декоративных растений ГБС РАН отдельно назовем уникальный сорт — ‘Ernest Markham’, созданный в Англии в 1930-х годах. Он давно и активно используется в схемах гибридизации в качестве материнской формы и, вероятно, обладает высокой комбинационной способностью.

Для реализации потенциальных возможностей использования коллекции сортов рода *Clematis* L. лаборатории декоративных растений ГБС РАН в образовательных (биологическое образование) и просветительских (эколого-ботаническое просвещение) целях авторами настоящей статьи работы предложен вариант размещения части входящих в ее состав культиваров (91 сорт — 54 % от общего числа наименований) на коллекционно-экспозиционном участке «Декоративные многолетники», расположенном на основной территории ГБС РАН (рис. 4).

Авторами предложено следующее расположение сортов рода *Clematis* L. на коллекционно-экспозиционном участке «Декоративные многолетники».

Англия

1850–1859 гг.: ‘Jackmanii’; 1860–1869 гг.: ‘Madame van Houtte’, ‘Star of India’, ‘Victoria’; 1870–1879 гг.: ‘Belle of Woking’, ‘Gipsy Queen’, ‘The President’; 1880–1889 гг.: ‘Daniel Deronda’; 1900–1909 гг.: ‘Little Nell’; 1930–1939 гг.: ‘Ernest Markham’, ‘Markham’s Pink’; 1940–1949 гг.: ‘Hagley Hybrid’; 1950–1959 гг.: ‘Bees Jubilee’, ‘Vyvyan Pennell’; 1960–1969 гг.: ‘Margaret Hunt’, ‘Mrs. N. Thompson’; 1970–1979 гг.: ‘Joan Picton’, ‘Veronica’s Choice’; 1980–1989 гг.: ‘Duchess of Edinburgh’, ‘Princess Diana’; 1990–1999 гг.: ‘Avant-Garde’, ‘Rhapsody’;

Германия

1890–1899 гг.: ‘Elsa Späth’; 2000–2009 гг.: ‘Dark Eyes’;

Нидерланды

1930–1939 гг.: ‘Inspiration’; 1980–1989 гг.: ‘Multi Blue’; 1990–1999 гг.: ‘Blue Light’, ‘Golden Tiara’; 2000–2009 гг.: ‘Mississippi River’, ‘My Angel’;

Польша

1960–1969 гг.: ‘General Sikorski’; 1970–1979 гг.: ‘Baltyk’, ‘Matka Siedliska’, ‘Niobe’; 1980–1989 гг.:

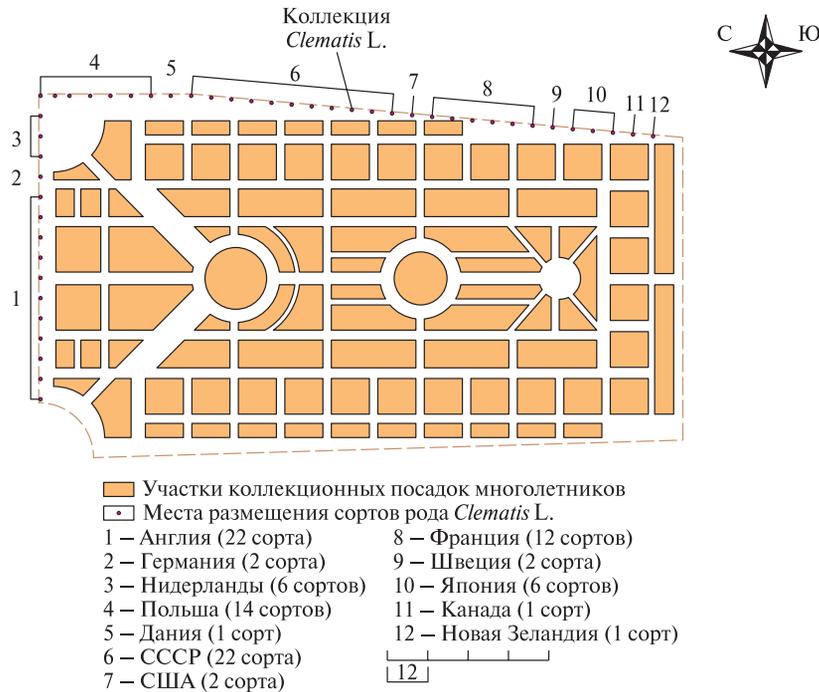


Рис. 4. Вариант расположения части коллекции сортов рода *Clematis* L. на плане-схеме коллекционно-экспозиционного участка лаборатории декоративных растений ГБС РАН (с приоритетным размещением культиваров в зависимости от страны происхождения)

Fig. 4. A variant of the location of a part of the collection of varieties of the genus *Clematis* L. on the collection-exposition section of the Laboratory of Ornamental Plants MBG RAS (with priority placement of cultivars depending on the country of origin)

‘Jan Pawel II’, ‘Matka Urszula Ledochowska’, ‘Polish Spirit’, ‘Warszawska Nike’; 1990–1999 гг.: ‘Julka’, ‘Solidarnosc’, ‘Sympatia’, ‘Westerplatte’; 2000–2009 гг.: ‘Barbara’, ‘Lech Walesa’;

Дания

1990–1999 гг.: ‘Princesse Alexandra’;

СССР

1960–1969 гг.: ‘Аленушка’, ‘Космическая мелодия’, ‘Надежда’, ‘Негритянка’, ‘Никитский розовый’, ‘Николай Рубцов’, ‘Память сердца’, ‘Юбилейный-70’; 1970–1979 гг.: ‘Лесная опера’, ‘Серенада Крыма’, ‘Сизая птица’, ‘Стасик’, ‘Тучка’, ‘Чайка’, ‘Южная ночь’, ‘Ялтинский этюд’; 1980–1989 гг.: ‘Bella’, ‘Ekstra’, ‘Esperanto’, ‘Justa’, ‘Piilu’, ‘Tentel’;

США

1980–1989 гг.: ‘Carnaby’, ‘Sunset’;

Франция

1860–1869 гг.: ‘Jeanne d’Arc’; 1870–1879 гг.: ‘Durandii’; 1880–1889 гг.: ‘Etoile Violette’, ‘Madame Baron Veillard’; 1890–1899 гг.: ‘Nelly Moser’, ‘Purpurea Plena Elegans’, ‘Ville de Lyon’; 1900–1909 гг.: ‘Comtesse de Bouchaud’, ‘Madame Julia Correvon’; 1910–1919 гг.: ‘Capitaine Thuilleaux’; 1960–1969 гг.: ‘Etoile de Malicorne’, ‘Rouge Cardinal’;

Швеция

1940–1949 гг.: ‘Moonlight’; 1950–1959 гг.: ‘Carmencita’;

Япония

1950–1959 гг.: ‘Fujimusume’, ‘Hakuookan’; 1970–1979 гг.: ‘Kakio’; 1980–1989 гг.: ‘Omoshiro’; 1990–1999 гг.: ‘Frau Mikiko’; 2000–2009 гг.: ‘Utopia’;

Канада

1970–1979 гг.: ‘Pink Fantasy’;

Новая Зеландия

1960–1969 гг.: ‘Allanah’.

При этом выбрана схема посадки растений с использованием стационарных опор (рис. 5).

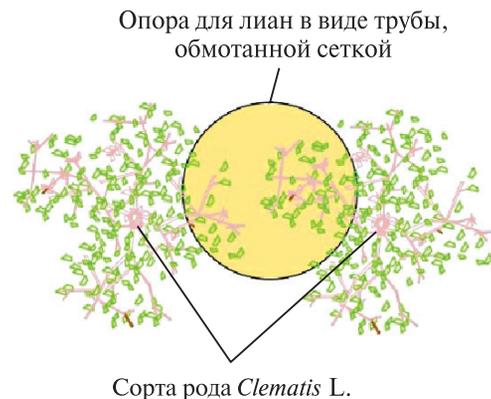


Рис. 5. Схема посадки сортов рода *Clematis* L.
Fig. 5. Planting plan of varieties of the genus *Clematis* L.

Выводы

1. Показано, что в составе современной коллекции сортов рода *Clematis* L. лаборатории декоративных растений ГБС РАН доминируют культивары II и III группы обрезки, составляя 96 % от ее общего объема.

2. Установлено, что в соответствии с географической локализацией центров развития селекции клематисов в коллекции содержатся селекционные достижения 12 стран: Великобритании, СССР, Польши, Франции, Голландии, Японии, Германии, США, Швеции, Дании, Канады и Новая Зеландии. Но закономерно доминируют сорта, созданные в Великобритании и СССР.

3. Выявлено, что в состав коллекции входят культивары, представляющие различные хронологические периоды селекции культуры, что позволяет проследить микроэволюционные изменения представителей рода *Clematis* L. под действием искусственного отбора.

Работа выполнена в рамках ГЗ ГБС РАН (№ 18-118021490111-5).

Список литературы

- [1] Toomey M., Leeds E. An Illustrated Encyclopedia of Clematis. Portland: Timber Press, 2001, 426 p.
- [2] Риекстиня В.Э., Риекстиныш И.Р. Клематисы. Л.: Агропромиздат, Ленинградское отделение, 1990. 287 с.
- [3] Орлов М.И. Клематисы. Киев: Урожай, 1972. 66 с.
- [4] Русанов Ф.Н. Новые методы интродукции растений // Бюл. Главного ботанического сада, 1950. Вып. 7. С. 27–36
- [5] Бескаравайная М.А. Методические указания по первичному сортоизучению клематисов. Ялта: Изд-во Никитского ботанического сада, 1975. 36 с.
- [6] Бескаравайная М.А., Тимошенко Н.М. Методические указания по культуре и подбору ассортимента крупноцветковых клематисов. Ялта: Изд-во Никитского ботанического сада, 1977. 36 с.
- [7] Карписонова Р.А., Демидов А.С. Принципы создания и изучения коллекций декоративных растений ГБС РАН // Информационный бюллетень Совета ботанических садов России, 1997. № 7. С. 25–31.
- [8] Коллекция клематисов Ботанического сада УРО РАН, 2021. URL: <http://botgard.uran.ru/index.php/kollektsii/rasteniya-otkrytogo-grunta/37-kollektsii/107-klematisy> (дата обращения 12.05.2021).
- [9] Центральный сибирский ботанический сад СО РАН, 2021. URL: https://csbg-nsk.ru/unu_collection (дата обращения 30.04.2021).
- [10] Южно-Уральский ботанический сад-институт, 2021. URL: <https://xn--80aacn2csgej.xn--p1ai/kolektsiya/rasteniya-otkrytogo-grunta/klematisy-clematis/> (дата обращения 15.04.2021).
- [11] НИИ Ботанический сад Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, 2021. URL: <http://www.unn.ru/botanicus/cat.htm> (дата обращения 01.04.2021).
- [12] Ботанический сад-институт ДВО РАН, 2021. URL: <https://www.botsad.ru/menu/visitors/collections-bgi-feb-ras/catalog/> (дата обращения 11.04.2021).
- [13] Ботанический сад Самарского государственного университета, 2021. URL: <https://ssau.ru/botsad> (дата обращения 15.04.2021).
- [14] Бочкова И.Ю. Создаем красивый цветник. Принципы подбора растений. Основы проектирования. М.: Фитон+, 2015. 240 с.
- [15] Демидов А.С., Кузьмин З.Е., Шатко В.Г. Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН (история, становление и достижения). К 60-летию основания. М.: ГБС РАН; Тула: Гриф и К, 2005. 112 с.
- [16] Рогинский А.В. Анализ и перспективы интродукции видов рода *Clematis* L. флоры Советского Дальнего Востока: автореф. дис. ... канд. биол. наук. М.: Изд-во Главного ботанического сада, 1988. 23 с.
- [17] Бескаравайная М.А. Клематис. Киев: Урожай. 1989. 142 с.
- [18] Evison R.J. The Gardener's Guide to Growing Clematis. Portland: Timber Press, 1998, 154 p.
- [19] Бескаравайная М.А. Культура и селекция клематиса (практические рекомендации). Ялта: Изд-во Государственного Никитского ботанического сада, 1983. 115 с.
- [20] Бранденбург В.Л., Ван де Ворен Е.Г. Крупноцветковые клематисы: виды, гибриды и культивары // Вклад селекционеров в развитие культуры клематиса. Рига: Изд-во Бот. сада АН ЛатвССР, 1988. С. 67–75.
- [21] Донюшкина Е.А., Зубкова Н.В. Клематисы. М.: Кладезь Букс, 2005. 96 с.
- [22] Fisk J. Clematis. The Queen of Climbers. England: Cassel, 1989, 160 p.
- [23] British Clematis Society, 2021. URL: <http://www.british-clematis.org.uk/pruning.htm> (дата обращения 10.01.21).
- [24] Максимов В.А. Клематисы. Л.: Лениздат, 1985. 404 с.
- [25] Johnson M. The Genus *Clematis* L. Sweden: Plantskola AB. Sodertalje, 2001, 156 p.
- [26] Коротков О.И. Формирование и комплексное изучение коллекции клематисов (род *Clematis* L.): биотехнологические и молекулярно-генетические аспекты: дис. ... канд. биол. наук. М.: Изд-во ГБС РАН, 2008. 239 с.
- [27] Tamura M. A classification of genus *Clematis* // Acta Phytotax. Geobot, 1987, v. 38, pp. 38–44.
- [28] Шаповалова Н.Н. Никитский сад – родина отечественных шедевров клематиса. URL: <https://www.agroxxi.ru/zhurnal-agromir-xxi/stati-rastenievodstvo/nikitskii-sad-rodina-otechestvennyh-shedevrov-klematisa.html>. (дата обращения 15.11.2021)
- [29] Кивистик У.Я. Девять лет селекции клематисов // Вклад селекционеров в развитие культуры клематиса. Рига: Изд-во Бот. сада АН ЛатвССР, 1988. С. 36–42.
- [30] Зубкова Н.В. Биологические особенности представителей рода *Clematis* L. Никитского ботанического сада: дис. ...канд. биол. наук. Ялта, Никитский ботанический сад, 2018. 271с.
- [31] Fretwell V. Clematis. London: Collins, 1989, 160 p.
- [32] Калоша Н.В., Польшинцев В.М. Клематисы. Новосибирск, 2004. 26 с.
- [33] Ткаченко К.Г., Ши Л. Общественные и ботанические сады Китая — как центры сохранения и изучения культурного наследия, приоритета экологии на службе улучшения жизни человека // Hortus botanicus, 2018. Т. 1. С. 786–789. URL: <http://hb.karelia.ru/journal/article.php?id=5744> (дата обращения 19.12.2020).
- [34] Горбунов Ю.Н. Стратегия ботанических садов России по сохранению биоразнообразия растений. URL: <http://ibpc.ysn.ru/wp-content/uploads/2017/03/СТРАТЕГИЯ-Ботсадов-России.pdf> (дата обращения 12.01.2021).

Сведения об авторах

Трубина Нина Николаевна — агроном, ФГБУН «Главный ботанический сад имени Н.В. Цицина РАН», n.trubina@bk.ru

Мамаева Наталья Анатольевна — канд. биол. наук, ст. науч. сотр. ФГБУН «Главный ботанический сад имени Н.В. Цицина РАН», mamaeva_n@list.ru

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

Поступила в редакцию 19.11.2021.

Одобрено после рецензирования 25.02.2022.

Принята к публикации 13.05.2022.

ANALYSIS OF GENUS CLEMATIS L. VARIETIES COLLECTION IN MODERN COLLECTION FUND OF MAIN BOTANICAL GARDEN RAS LABORATORY OF ORNAMENTAL PLANTS

N.N. Trubina, N.A. Mamaeva, Yu.A. Khokhlacheva✉

The N.V. Tsitsin Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences, 4, Botanicheskaya st., 127276, Moscow, Russia
jusic-la@yandex.ru

This paper presents the results of the analysis of the structure of the modern collection of varieties of the genus *Clematis* L. of the Laboratory of Ornamental Plants of the Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences. The peculiarities of the distribution of cultivars by belonging to the pruning groups are established. The distribution of varieties depending on their country of origin is characterized. The dominance of the USSR and Great Britain, which at different times were the leaders of the world culture selection, is revealed. The distribution of varieties by the periods of their creation has been studied: from cultivars obtained in 1850–1860 to the breeding achievements of the XXI century, which confirms the presence of a wide morphological diversity of cultigenic representatives of the genus *Clematis* L. A variant of placing some varieties on the collection and exposition site of the Laboratory of Ornamental Plants of the Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences, allowing, in addition to scientific work, if necessary, implement educational and educational projects.

Keywords: varieties of the genus *Clematis* L., collection, history of breeding, placement of varieties

Suggested citation: Trubina N.N., Mamaeva N.A., Khokhlacheva Yu.A. *Analiz struktury kollektsii sortov roda Clematis L. v sostave sovremennogo kollektsionnogo fonda laboratorii dekorativnykh rasteniy Glavnogo botanicheskogo sada RAN* [Analysis of genus *Clematis* L. varieties collection in modern collection fund of Main Botanical Garden RAS Laboratory of Ornamental Plants]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 3, pp. 93–104. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-93-104

References

- [1] Toomey M., Leeds E. *An Illustrated Encyclopedia of Clematis*. Portland: Timber Press, 2001, 426 p.
- [2] Riekstina V.E., Riekstin'sh I.R. *Klematisy* [Clematis]. Leningrad: Agropromizdat, Leningrad branch, 1990, 287 p.
- [3] Orlov M.I. *Klematisy* [Clematis]. Kiev: Urozhay, 1972, 66 p.
- [4] Rusanov F.N. *Novye metody introduksii rasteniy* [New methods of plant introduction]. *Byul. Glavnogo botanicheskogo sada* [Bulletin of the Main Botanical Garden], 1950, iss 7, pp. 27–36.
- [5] Beskaravaynaya M.A. *Metodicheskie ukazaniya po pervichnomu sortoizucheniyu klematisov* [Methodological guidelines for the primary variety study of clematis]. Yalta: Nikitskiy botanicheskiy sad [Nikitsky Botanical Garden], 1975, 36 p.
- [6] Beskaravaynaya M.A., Timoshenko N.M. *Metodicheskie ukazaniya po kul'ture i podboru assortimenta krupnotsvetkovykh klematisov* [Guidelines for the culture and selection of the assortment of large-flowered clematis]. Yalta: Nikitskiy botanicheskiy sad [Nikitsky Botanical Garden], 36 p.
- [7] Karpisonova R.A., Demidov A.S. *Printsipy sozdaniya i izucheniya kollektsiy dekorativnykh rasteniy GBS RAN* [Principles of creation and study of collections of ornamental plants of the MBG RAS]. *Informatsionnyy byulleten' Soveta botanicheskikh sadov Rossii* [Newsletter Council of Botanic Gardens of Russia], 1997, iss. 7, pp. 25–31.
- [8] *Kollektsiya klematisov Botanicheskogo sada URO RAN* [Collection of clematis of the Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences], 2021. Available at: <http://botgard.uran.ru/index.php/kollektsii/rasteniya-otkrytogo-grunta/37-kollektsii/107-klematisy> (accessed 12.05.2021).
- [9] *Tsentral'nyy sibirskiy botanicheskiy sad SO RAN* [Central Siberian Botanical Garden Siberian Branch RAS], 2021. Available at: https://csbg-nsk.ru/unu_collection (accessed 30.04.2021).
- [10] *Yuzhno-Ural'skiy botanicheskiy sad-institut* [South Ural Botanical Garden-Institute], 2021. Available at: <https://xn--80aacn2csegej.xn--p1ai/kollektsiya/rasteniya-otkrytogo-grunta/klematisy-clematis/> (accessed 15.04.2021).
- [11] *NII Botanicheskiy sad Nizhegorodskogo gosudarstvennogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo* [Research Institute Botanical Garden of Nizhny Novgorod State University named after N.I. Lobachevsky], 2021. Available at: <http://www.unn.ru/botanicus/cat.htm> (accessed 01.04.2021).
- [12] *Botanicheskiy sad-institut DVO RAN* [Botanical Garden-Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences], 2021. Available at: <https://www.botsad.ru/menu/visitors/collections-bgi-feb-ras/catalog/> (accessed 11.04.2021).

- [13] *Botanicheskiy sad Samarskogo gosudarstvennogo universiteta* [Botanical Garden of Samara State University], 2021. Available at: <https://ssau.ru/botsad> (accessed 15.04.2021).
- [14] Bochkova I.Yu. *Sozdaem krasivyy tsvetnik. Printsipy podbora rasteniy. Osnovy proektirovaniya* [Creating a stylish flower garden. Principles of plant selection. Design basics]. Moscow: Phytion+, 2015, 240 p.
- [15] Demidov A.S., Kuz'min Z.E., Shatko V.G. *Glavnyy botanicheskiy sad im. N.V. Tsitsina RAN (istoriya, stanovlenie i dostizheniya). K 60-letiyu osnovaniya* [N.V. Tsitsin Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences (history, formation and achievements). To the 60th anniversary of the foundation]. Moscow: GBS RAS; Tula: Griph and K, 2005, 112 p.
- [16] Roginskiy A.V. *Analiz i perspektivy introduksii vidov roda Clematis L. flory Sovetskogo Dal'nego Vostoka* [Analysis and prospects of introduction of species of the genus *Clematis* L. flora of the Soviet Far East]. Dis. Cand. Sci. (Biol.). Moscow, USSR Academy OF Sciences. Main Botanical Garden, 1988.
- [17] Beskaravaynaya M.A. *Klematis* [Clematis]. Kiev: Urozhaj, 1989, 142 p.
- [18] Evison R.J. *The Gardener's Guide to Growing Clematis*. Portland: Timber Press, 1998, 154 p.
- [19] Beskaravaynaya M.A. *Kul'tura i selektsiya klematisa (prakticheskie rekomendatsii)* [Culture and breeding of clematis (practical recommendations)]. Yalta, 1983, 115 p.
- [20] Brandenburg V.L., Van de Voren E.G. *Krupnotsvetkovye klematisy: vidy, gibridy i kul'tivary* [Large-flowered clematis: Species, hybrids and cultivars]. Vklad selektsionerov v razvitie kul'tury klematisa [Contribution of breeders to the development of clematis culture], Riga: Bot Garden of the Latvian SSR Academy of Sciences, 1988, pp. 67–75.
- [21] Donyushkina E.A., Zubkova N.V. *Klematisy* [Clematis]. Moscow: Kladez-Buks, 2005, 96 p.
- [22] Fisk J. *Clematis. The Queen of Climbers*. England, 1989, 160 p.
- [23] British Clematis Society, 2021. Available at: <http://www.britishclematis.org.uk/pruning.htm> (accessed 10.01.21).
- [24] Maksimov V.A. *Klematisy* [Clematis]. Leningrad: Lenizdat, 1985, 404 p.
- [25] Johnson M. *The Genus Clematis L.* Sweden: Plantskola AB. Sodertalje, 2001, 156 p.
- [26] Korotkov O.I. *Formirovanie i kompleksnoe izuchenie kolleksii klematisov (rod Clematis L.): biotekhnologicheskie i molekulyarno-geneticheskie aspekty* [Formation and comprehensive study of the clematis collection (genus *Clematis* L.): biotechnological and molecular genetic aspects]. Dis. Sci. Cand. (Biol.). Moscow: Maim Botanical Garden, 2008.
- [27] Tamura M. A classification of genus *Clematis*. *Acta Phytotax. Geobot.*, 1987, v. 38, pp. 38–44.
- [28] Shapovalova N.N. *Nikitskiy sad — rodina otechestvennykh shedevrov klematisa* [Nikitsky Garden — the birthplace of domestic masterpieces of clematis]. Available at: <https://www.agroxxi.ru/zhurnal-agromir-xxi/stati-rasteniievodstvo/nikitskii-sad-rodina-otechestvennykh-shedevrov-klematisa.html>. (accessed 15.11.2021)
- [29] Kivistik U.Ya. *Devyat' let selektsii klematisov* [Nine years of clematis breeding]. Vklad selektsionerov v razvitie kul'tury klematisa [Contribution of breeders to the development of clematis culture]. Riga: Bot Garden of the Latvian SSR Academy of Sciences, 1988, pp. 36–42.
- [30] Zubkova N.V. *Biologicheskie osobennosti predstaviteley roda Clematis L. Nikitskogo botanicheskogo sada* [Biological features of representatives of the genus *Clematis* L. of the Nikitsky Botanical Garden]. Dis. Sci. Cand. (Biol.). Yalta: Nikitsky Botanical Garden, 2018.
- [31] Fretwell V. *Clematis*. London: Collins, 1989, 160 p.
- [32] Kalosha N.V., Polyntsev V.M. *Klematisy* [Clematis]. Novosibirsk, 2004, 26 p.
- [33] Tkachenko K.G., Shi L. *Obshchestvennye i botanicheskie sady Kitaya — kak tsentry sokhraneniya i izucheniya kul'turnogo naslediya, prioriteta ekologii na sluzhbe uluchsheniya zhizni cheloveka* [Public and botanical gardens of China as centers for the preservation and study of cultural heritage, the priority of ecology in the service of improving human life]. *Hortus botanicus* [Hortus botanicus], 2018, v. 1, pp. 786–789. Available at: <http://hb.karelia.ru/journal/atricle.php?id=5744> (accessed 19.12.2020).
- [34] Gorbunov Yu.N. *Strategiya botanicheskikh sadov Rossii po sokhraneniyu bioraznoobraziya rasteniy* [Strategy of Botanical Gardens of Russia for the conservation of plant biodiversity]. Institut biologicheskikh problem kriolitozony Sibirskogo otdeleniya RAN [Institute of Biological Problems of the Cryolithozone of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences], 2003. Available at: <http://ibpc.ysn.ru/wp-content/uploads/2017/03/СТРАТЕГИЯ-Ботсадов-России.pdf> (accessed 12.01.2021).

The work was carried out within the framework of the State Budget of GBS RAS (№ 18-118021490111-5).

Authors' information

Trubina Nina Nikolaevna — Agronomist of the N.V. Tsitsin Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences, n.trubina@bk.ru

Mamaeva Natal'ya Anatol'yevna — Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher of the N.V. Tsitsin Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences, mamaeva_n@list.ru

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

Received 19.11.2021.

Approved after review 25.02.2022.

Accepted for publication 13.05.2022.

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

РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СЛАБООСНОВНЫХ КАТИОННЫХ ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТОВ В ТЕХНОЛОГИИ БУМАГИ И КАРТОНА

Н.В. Черная✉, Ж.С. Шашок, С.В. Карпова,
Е.П. Усс, О.А. Мисюров

УО «Белорусский государственный технологический университет», 220006, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Свердлова, д. 13а

chornaya@belstu.by

Исследовано влияние слабоосновных катионных полиэлектролитов на структурообразующие и бумагообразующие свойства проклеенных волокнистых суспензий и на качество полученных из них клееных и мелованных образцов бумаги и картона. Впервые показано, что эффективность применения катионных полиэлектролитов повышается по отношению к канифольной эмульсии и электролиту в 2–3 раза за счет изменения последовательности их введения в проклеенные волокнистые суспензии (целлюлозные и макулатурные) и вследствие «корректирования» их расхода. Установлено, что использование разработанной технологии позволяет участвовать катионным полиэлектролитам не только в процессе флокуляции, но и в формировании новых проклеивающих комплексов в виде мелкодисперсных положительно заряженных пептизированных частиц. Выявлено, что замена процесса проклейки в режиме гомокоагуляции на более эффективный режим гетероадагуляции пептизированных частиц вследствие применения слабоосновных катионных полиэлектролитов обеспечивает повышение гидрофобности и прочности клееных видов бумаги и картона. Обоснована целесообразность использования катионных полиэлектролитов для получения высококачественной продукции в разработанной ресурсосберегающей и экологически безопасной технологии клееных видов бумаги и картона на основании установленного увеличения степени удержания волокон и проклеивающих комплексов и одновременного снижения содержания взвешенных веществ в оборотной воде. Определено, что мелование клееных образцов бумаги и картона, полученных с использованием слабоосновных катионных полиэлектролитов, позволяет улучшить печатные свойства полученной продукции. Даны рекомендации по замене в рецептуре меловальной пасты традиционно применяемого комплекса природных соединений, включающего в себя крахмал окисленный (2,0 мас. ч.), натрийкарбоксиметилцеллюлозу (0,7 мас. ч.) и казиновый клей (2,0 мас. ч.), на одно синтетическое связующее — модифицированный карбамидоформальдегидный олигомер (3,2 мас. ч.).

Ключевые слова: проклейка, гомокоагуляция, гетероадагуляция, упрочнение, структурообразование, флокуляция

Ссылка для цитирования: Черная Н.В., Шашок Ж.С., Карпова С.В., Усс Е.П., Мисюров О.А. Разработка способа повышения эффективности применения слабоосновных катионных полиэлектролитов в технологии бумаги и картона // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 3. С. 105–114.
DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-105-114

Высоким потребительским спросом пользуются клееные и мелованные виды бумаги и картона [1], отличающиеся свойствами и областью применения. Свойства клееных видов бумаги и картона зависят от многих технологических факторов, влияющих на технологию их получения [2]. Наиболее важными являются композиционный состав бумаги и картона по волокну и способы применения функциональных химических веществ, к числу которых относятся канифольные эмульсии (КЭ), электролиты и катионные полиэлектролиты (КП). Распространенными первичными и вторичными волокнистыми полуфабрикатами являются целлюлоза и макулатура соответственно. Для обеспечения волокнистых суспензий необходимыми структурообразующими, реологическими

и бумагообразующими свойствами в них последовательно добавляют нужное количество химических веществ [3–7], существенно влияющих на характер протекающих процессов и качество клееных видов бумаги и картона. Особое значение имеют такие технологические и экологические параметры, как степень удержания в структуре бумаги и картона присутствующих компонентов и содержание сухих веществ в подсеточной воде.

Электролиты и КЭ обеспечивают образование проклеивающих комплексов за счет протекающего коллоидно-химического и электростатического взаимодействия. Последующее добавление в проклеенную бумажную массу КП повышает степень удержания волокон в структуре бумаги и картона благодаря их участию в процессе флокуляции. Однако они усиливают агрегирование проклеивающих комплексов, что снижает степень их

удержания в структуре бумаги и картона и ухудшает не только гидрофобность, но и прочность бумаги и картона. На завершающей стадии получения бумаги и картона в ходе их термообработки происходят плавление и спекание проклеивающих комплексов, что способствует формированию на поверхности волокон гидрофобного слоя. Его равномерность и толщина существенно влияют на гидрофобность бумаги и картона [8]. Гидрофобный слой, как правило, препятствует связеобразованию в структуре бумаги и картона, а увеличение его толщины [9], обусловленное присутствием полиэлектролита, приводит к значительному уменьшению их прочности.

Таким образом, в технологии клееных видов бумаги и картона остается нерешенной актуальная проблема повышения эффективности применения полиэлектролита за счет одновременного повышения степени удержания проклеивающих комплексов и волокон. В настоящее время широко применяют КП [10–19], имеющие необходимую структуру и обладающие соответствующими физико-химическими свойствами, а также флокулирующим действием на проклеенные волокнистые суспензии. На предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности широко применяют слабоосновные КП. Существующая технология использования КП в последовательности КЭ — электролит — КП основана на протекании процессов сначала проклейки в режиме гомотоагуляции, а затем — флокуляции. Однако КП могут, по нашему мнению [2, 8, 9], участвовать не только в процессе флокуляции [10–19], но и в процессах формирования и образования проклеивающих комплексов (коагулятов и пептизированных частиц), коагуляции, пептизации, проклейки (в режимах гомотоагуляции или гетероадагуляции), связеобразования, упрочнения и структурообразования. При этом в зависимости от содержания КП в волокнистой суспензии процесс флокуляции может протекать по различным механизмам [2, 7, 8]: мостичному, нейтрализационному или мозаичному. Особое значение имеют структура, дисперсность и электрокинетический потенциал проклеивающих комплексов [2, 8], а также характер коллоидно-химических и электростатических взаимодействий [9], протекающих между отрицательно заряженными частицами дисперсной фазы КЭ и положительно заряженными формами гидроксо соединений алюминия, введенными в волокнистую суспензию с раствором электролита. Поэтому перспективным направлением исследования является повышение эффективности применения КП за счет изменения последовательности дозирования его в волокнистую суспензию по отношению к КЭ и электролиту и одновременного

повышения гидрофобности и прочности бумаги и картона, а также увеличения степени удержания волокон и проклеивающих комплексов в их структуре.

Последующее мелование клееных видов бумаги и картона улучшает их печатные свойства и расширяет область их применения. В связи с этим улучшение когезионного и адгезионного взаимодействия компонентов в меловальных пастах является актуальной задачей. Одним из перспективных способов ее решения служит замена комплекса природных соединений на одно синтетическое, содержащее в своей структуре амидные и аминные группы. К таким соединениям относится синтезированный нами модифицированный карбамидоформальдегидный олигомер (МКФО) [20].

Таким образом, отсутствие в научной и технической литературе научно обоснованных практических рекомендаций по повышению эффективности применения КП в технологии клееных видов бумаги и картона и последующего их мелования с использованием одного синтетического связующего МКФО вместо трех природных обуславливает актуальность настоящей работы.

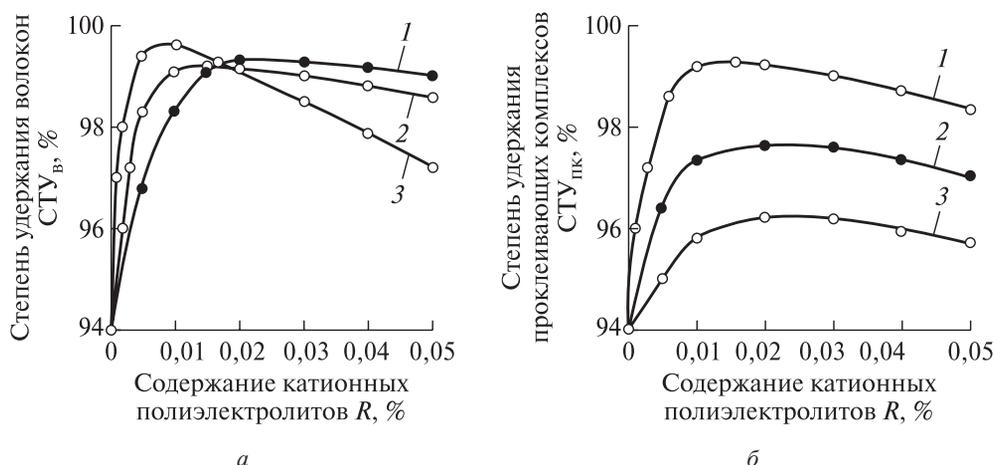
Цель работы

Цель работы — исследование влияния различных способов использования слабоосновных КП в проклеенных волокнистых суспензиях (макулатурных и целлюлозных) на эффективность протекающих процессов (проклейки, связеобразования, структурообразования, упрочнения и флокуляции) и разных типов взаимодействия (коллоидно-химического, электростатического, когезионного и адгезионного) на качество клееных и мелованных видов бумаги и картона.

Объекты и методы исследования

Объекты исследования — проклеенные волокнистые суспензии (макулатурные и целлюлозные) с использованием КЭ в нейтральной среде в присутствии КП и электролита и полученные из них клееные и мелованные образцы бумаги и картона.

Функциональные химические вещества вводили в волокнистые суспензии по существующей (КЭ — электролит — КП) и двум новым (КЭ — КП — электролит и КП — КЭ — электролит) технологиям. Содержание КЭ и электролита в волокнистых суспензиях было постоянным и составляло 0,30 и 0,24 % абсолютно сухого волокна соответственно. Содержание КП (*R*) в проклеенных волокнистых суспензиях увеличивали от 0,005 до 0,050 % относительно абсолютно сухого волокна. В качестве КП использовали



Зависимости влияния содержания КП относительно абсолютно сухого волокна в макулатурных суспензиях на степень удержания волокон $СтУ_v$ (а) и степень удержания проклеивающих комплексов $СтУ_{пк}$ (б): 1 — последовательность 1; 2 — последовательность 2; 3 — последовательность 3

Dependences of the CP content relative to absolutely dry fiber in waste paper suspensions on the degree of retention of StU_v fibers (а) and the degree of retention of $StU_{пк}$ sizing complexes (б): 1 — sequence 1; 2 — sequence 2; 3 — sequence 3

полиамидполиаминэпихлоргидриновую смолу (ТУ РБ 300041455.021–2001). Концентрация приготовленного раствора составляла 0,001 %. КЭ содержали 0,2 % сухих веществ, их получали разбавлением водой товарного 50%-го продукта ТМВС-2Н (ТУ РБ 00280198-029–97), содержащего модифицированные смоляные кислоты. Исходные частицы дисперсной фазы КЭ имели средний диаметр $d_0 = 190$ нм и отрицательный электрокинетический потенциал ($\xi_0 = -25$ мВ). В качестве электролита использовали 0,5%-й раствор сульфата алюминия (ГОСТ 12966–85). Он имел рН 4,3 и содержал гидроксо соединения алюминия [21]: 85 % $Al(H_2O)_6^{3+}$, 10 % $Al(H_2O)_5(OH)^{2+}$ и 5 % $Al(H_2O)_4(OH)_2^+$.

Значение потенциала ξ и дисперсность проклеивающих комплексов определяли на анализаторе заряда частиц CAS (Германия) и растровом электронном микроскопе JSM-5610 LV (JEOL Ltd, Япония) соответственно. Турбидиметрические исследования проводили на фотоэлектроколориметре КФК-2 по стандартной методике [22].

Клееные образцы бумаги и элементарных слоев картона (ЭСК) изготавливали из целлюлозы (ГОСТ 9571–89) и макулатуры (ГОСТ 107000–89) на листоотливном аппарате «Rapid-Ketten» («Ernst Naage», Германия) по стандартной методике. Степень удержания волокон ($СтУ_v$) и проклеивающих комплексов ($СтУ_{пк}$) определяли по ГОСТ 30578–89 (ISO 9562–89) и методом экстрагирования в этиловом спирте [23] соответственно. Содержание сухих веществ в подсеточной воде (С) определяли по ГОСТ 14363.5–71. Качество

полученных образцов бумаги и ЭСК характеризовали по впитываемости при одностороннем смачивании (ГОСТ 12606–82Е), по степени проклейки по штриховому методу (ГОСТ 8049–62), разрывной длине (ГОСТ 13525.1–79) и влагопрочности (ГОСТ 13525.7–68). Образцами сравнения служили волокнистые суспензии, не содержащие КП ($R = 0$), и полученные из них образцы бумаги и ЭСК; получено, что для макулатурных образцов — $СтУ_v = 94,3$ %, $СтУ_{пк} = 70,4$ % и $C = 11,8$ мг/л, для целлюлозных — $СтУ_v = 96,6$ %, $СтУ_{пк} = 78,4$ % и $C = 8,6$ мг/л.

Мелованные образцы бумаги и ЭСК получали на моделирующей установке (Германия) путем одностороннего мелования (10 г/м²) поверхности изготовленных клееных образцов бумаги и ЭСК. Рецепт меловальной пасты отличалась от стандартной [24] видом присутствующих связующих. В качестве последних использовали впервые синтезированный нами МКФО (4,7 мас. ч.) [22, 25] (разработанная технология) вместо используемого по существующей технологии комплекса природных соединений (4,7 мас. ч.) [24], включающего в себя окисленный крахмал (2,0 мас. ч.), натрийкарбоксиметилцеллюлозу (0,7 мас. ч.) и казеиновый клей (2,0 мас. ч.). Для мелованных образцов бумаги и ЭСК определяли массоемкость по ISO 536–1995, толщину по ISO 534–2005, белизну по ISO 2470–1999, гладкость по ISO 8791-4–1992 и стойкость поверхности к выщипыванию по ISO 3783–1980. Как образцы сравнения применяли пробы отобранных промышленных партий бумаги марок ДО (ГОСТ 21444–75) и ДЧ (ГОСТ 9095–89) и картона полиграфического марок FBB и SBB.

Результаты и обсуждение

Работы проводились в три этапа. Первый этап посвящен определению степени удержания волокон и проклеивающих комплексов в структуре образцов бумаги и ЭСК, содержания сухих веществ в подсеточной воде, второй — способам применения КП при получении клееных видов бумаги и картона, третий — исследованию свойств клееных видов бумаги и картона после их мелования с использованием нового синтетического связующего.

На первом этапе были установлены зависимости $СтУ_{\text{в}} = f(R)$ (рисунок, а) и $СтУ_{\text{пк}} = f(R)$ (рисунок, б) для введения КП в проклеенные макулатурные волокнистые суспензии следующими способами:

- последовательность 1 (кривые 1, существующая технология): КЭ — электролит — КП;
- последовательность 2 (кривые 2, исследуемая технология): КЭ — КП — электролит;
- последовательность 3 (кривые 3, исследуемая технология): КП — КЭ — электролит.

Аналогичные зависимости получены для проклеенных целлюлозных суспензий, для которых достигаемые положительные эффекты способствуют дальнейшему повышению значений $СтУ_{\text{в}}$ и $СтУ_{\text{пк}}$.

Из рисунка видно, что эффективность применения КП зависит от способа его введения в волокнистые суспензии и от его содержания в проклеенных бумажных массах (R). Полученные зависимости $СтУ_{\text{в}} = f(R)$ и $СтУ_{\text{пк}} = f(R)$ имеют экстремальный характер. Установлено, что максимальные значения $СтУ_{\text{в}}$ и $СтУ_{\text{пк}}$ можно достичь при определенных значениях R , которые считают предпочтительными — $R_{\text{пр}}$.

В макулатурных суспензиях эффективность применения КП повышается в последовательности 2 (КЭ — КП — электролит). Об этом свидетельствуют высокие значения $СтУ_{\text{в}} = 98,2\%$ и $СтУ_{\text{пк}} = 88,7\%$ при $R_{\text{пр}} = 0,015\%$ относительно абсолютно сухого волокна. По сравнению с образцами сравнения (без КП, $R = 0$) использование КП по последовательности 2 позволяет повысить $СтУ_{\text{в}}$ и $СтУ_{\text{пк}}$ на 3,8 и 18,3% соответственно. Получено, что КП в последовательности 2 позволяет уменьшить C в 3,1 раза, что свидетельствует о возможности повышения экологической безопасности действующих производств.

Использование последовательности 1 (КЭ — электролит — КП) (см. рисунок, кривые 1) при $R_{\text{пр}} = 0,010\%$ (относительно абсолютно сухого волокна) приводит, по нашему мнению, к протеканию в макулатурных суспензиях таких основных процессов, как коллоидно-химическое и электростатическое взаимодействие, гомоко-

агуляция и флокуляция. Сначала происходит коллоидно-химическое взаимодействие между частицами дисперсной фазы КЭ и гидроксокомплексами алюминия $Al(H_2O)_6^{3+}$, $Al(H_2O)_5(OH)^{2+}$ и $Al(H_2O)_4(OH)_2^+$, а затем протекает процесс электролитной коагуляции. Образовавшиеся разнотенциальные коагуломы (их электрокинетический потенциал находится в диапазоне $-20...+20$ мВ, средний диаметр составляет 190 нм) агрегируются, образуя проклеивающие комплексы в виде разнотенциальных крупнодисперсных (размером 3000...6000 нм) непептизирующихся коагулятов. После завершения процесса электролитной коагуляции происходят электростатические взаимодействия коагулятов с волокнами. Процесс проклейки протекает в режиме гомокоагуляции, о чем свидетельствует неравномерное распределение коагулятов и непрочная их фиксация на поверхности электронейтральных макулатурных волокон. Такие коагуляты механически удерживаются в структуре бумаги и картона, а коагуляты (3...4%), находящиеся в межволоконном пространстве, не участвуют в процессе гидрофобизации, поскольку удаляются с подсеточной водой. Поэтому механическое удержание проклеивающих комплексов объясняет достаточно высокие значения $СтУ_{\text{пк}}$, достигающие 96,5%. На завершающей стадии получения проклеенных макулатурных суспензий (после добавления КП) протекает процесс флокуляции волокон по мостичному механизму, о чем свидетельствуют высокие значения $СтУ_{\text{в}}$, достигающие 99,4%. Основным недостатком последовательности 1 является невысокая гидрофобность бумаги и ЭСК из-за протекающего процесса проклейки в режиме гомокоагуляции.

Применение последовательности 2 (КЭ — КП — электролит) (рисунок, кривые 2) при $R_{\text{пр}} = 0,015\%$ (относительно абсолютно сухого волокна) сопровождается протеканием в макулатурных суспензиях таких процессов, как коллоидно-химическое и электростатическое взаимодействие, коагуляция, пептизация, связеобразование, упрочнение и гетероадагуляция. Сначала молекулы КП участвуют в коллоидно-химическом взаимодействии с частицами дисперсной фазы КЭ и процессе образования проклеивающих комплексов. Последние представляют собой электронейтральные пептизирующиеся коагуляты, размер которых не превышает 3000 нм [9]. Затем протекает процесс дополнительного связеобразования между электронейтральными макулатурными волокнами и положительно заряженными азотсодержащими группами КП, что способствует протеканию процесса упрочнения и флокуляции по мозаичному механизму. При этом молекулы КП «связывают» волокна

между собой, что объясняет повышение $СтУ_{\text{в}}$ и увеличение прочности бумаги и ЭСК. Последующее введение электролита, содержащего 85 % $Al(H_2O)_6^{3+}$ (ионов-пептизаторов), завершает процесс формирования проклеивающих комплексов за счет пептизации (деагрегирования) коагулятов и получения из них новых проклеивающих комплексов в виде мелкодисперсных положительно заряженных пептизированных частиц, имеющих размер 190 нм и электрокинетический потенциал +50 мВ. Такие проклеивающие комплексы равномерно распределяются монослоем и прочно фиксируются на поверхности волокон. Процесс проклейки протекает в режиме гетероадагуляции, что объясняет высокую гидрофобность у образцов бумаги и ЭСК благодаря образованию на волокнах равномерного «тонкого» гидрофобного слоя [26].

Совокупность процессов, протекающих при $R_{\text{пр}} = 0,015$ % (относительно абсолютно сухого волокна), обеспечивает высокие значения параметров для проклеенных макулатурных суспензий: $СтУ_{\text{в}} = 98,2$ %, $СтУ_{\text{пк}} = 88,7$ % и $C = 3,8$ мг/л. При этом гидрофобность и прочность образцов бумаги и ЭСК показывают высокие значения.

Использование последовательности 3 (КП — КЭ — электролит) (рисунок, кривые 3) при $R_{\text{пр}} = 0,020$ % (относительно абсолютно сухого волокна) свидетельствует о том, что в макулатурных суспензиях протекает сначала процесс флокуляции, а затем происходит коллоидно-химическое и электростатическое взаимодействие, завершающееся процессами коагуляции и гомокоагуляции. Флокуляция протекает по нейтрализационному механизму сразу после введения КП в макулатурную суспензию, что обеспечивает снижение содержания сухих веществ в подсеточной воде C от 11,8 до 5,7 мг/л (в 2,0 раза) и объясняет повышение $СтУ_{\text{в}}$ от 94,4 до 97,5 % (на 3,1 %). Последующее введение КЭ и электролита приводит к протеканию сначала коллоидно-химического взаимодействия между частицами дисперсной фазы КЭ и гидроксосоединениями алюминия, а затем к образованию разнотенциальных коагулюмов, склонных к агрегированию. Протекающий коагуляционный процесс приводит к образованию проклеивающих комплексов, представляющих собой разнотенциальные разновеликие крупнодисперсные непептизирующиеся коагуляты, размер которых достигает 4500...6200 нм. В присутствии таких коагулятов процесс проклейки протекает в режиме гомокоагуляции. Поэтому $СтУ_{\text{пк}}$ не превышает 82,3 %, а качество образцов бумаги и ЭСК, полученных с использованием КП по последовательности 3, уступает качеству образцов, изготовленных с применением КП по последовательностям 1 и 2, несмотря на то, что оно выше качества образцов сравнения на 30...40 %.

Следовательно, эффективность применения КП в макулатурных суспензиях является высокой для последовательности 2, средней для последовательности 1 и низкой для последовательности 3. Предпочтительный расход КП по последовательности 2 составляет 0,015 % (относительно абсолютно сухого волокна). Целесообразность использования КП (последовательность 2) в технологии высококачественных видов бумаги и картона является обоснованной, поскольку $СтУ_{\text{в}}$ повышается от 94,4 до 98,2 % и $СтУ_{\text{пк}}$ — от 70,4 до 88,7 %.

В целлюлозных суспензиях эффективность применения КП выше, чем в макулатурных суспензиях, чему способствуют однородность фракционного состава целлюлозных волокон, сохраненная их первоначальная длина и присутствие отрицательно заряженных активных центров (гидроксильных групп). Такие условия обеспечивают не только улучшение коллоидно-химического и электростатического взаимодействия, протекающего при формировании проклеивающих комплексов, но и повышение эффективности совокупности протекающих процессов, аналогичных для макулатурных суспензий. Об этом свидетельствуют высокие значения $СтУ_{\text{в}}$, $СтУ_{\text{пк}}$ и C , достигаемые при замене макулатурных суспензий на целлюлозные. При этом предпочтительное содержание КП ($R_{\text{пр}}$) уменьшается на 0,003...0,005 % (относительно абсолютно сухого волокна) — 20...34 %. Практическая возможность экономии расхода КП зависит от способа его использования за счет снижения $R_{\text{пр}}$, % (относительно абсолютно сухого волокна):

- от 0,010 до 0,007 (на 30 %) для последовательности 1 (КЭ — электролит — КП);
- от 0,015 до 0,010 (на 34 %) для последовательности 2 (КЭ — КП — электролит);
- от 0,020 до 0,016 (на 20 %) для последовательности 3 (КП — КЭ — электролит).

Положительный эффект использования КП в целлюлозных суспензиях аналогичен зависимостям, полученным для макулатурных суспензий. Предпочтительное содержание КП в проклеенной целлюлозной суспензии, полученной по последовательности 2, составляет 0,010 % (относительно абсолютно сухого волокна). По сравнению с проклеенной макулатурной суспензией, когда $R_{\text{пр}} = 0,015$ % (относительно абсолютно сухого волокна), происходит дальнейшее увеличение $СтУ_{\text{в}}$ — от 98,2 до 99,7 % и $СтУ_{\text{пк}}$ — от 88,7 до 92,3 %. Следствием этого является уменьшение C от 3,8 до 3,0 мг/л, что свидетельствует о снижении в 1,2 раза отрицательного воздействия на окружающую среду.

Следовательно, применение КП в целлюлозных суспензиях по последовательности 2 позво-

Сравнение эффективности способов применения катионных полиэлектролитов в проклеенных макулатурных (числитель) и целлюлозных (знаменатель) суспензиях по существующей и исследуемым технологиям

Comparison of the methods for using cationic polyelectrolytes in glued waste paper (numerator) and pulp (denominator) suspensions according to existing and researched technologies

Способ	$R_{пр}$, %	Свойства волокнистой суспензии				Качество образцов бумаги и ЭСК			
		рН	С, мг/л	СтУ _в , %	СтУ _{пк} , %	гидрофобность		прочность	
Y_1 , г/м ²	Y_2 , мм					Y_3 , м	Y_4 , %		
Последовательность 1: КЭ — электролит — КП									
1	<u>0,010</u>	<u>7,2</u>	<u>5,6</u>	<u>99,4</u>	<u>96,5</u>	<u>20</u>	<u>2,0</u>	<u>3850</u>	<u>11,5</u>
	0,007	7,0	5,4	99,6	97,5	18	1,8	5600	14,0
Последовательность 2: КЭ — КП — электролит									
2	<u>0,015</u>	<u>7,0</u>	<u>3,8</u>	<u>98,2</u>	<u>88,7</u>	<u>17</u>	<u>2,2</u>	<u>5870</u>	<u>13,4</u>
	0,010	6,8	3,0	99,7	92,3	14	2,4	6500	15,6
Последовательность 3: КП — КЭ — электролит									
3	<u>0,020</u>	<u>6,8</u>	<u>5,7</u>	<u>97,5</u>	<u>82,3</u>	<u>19</u>	<u>2,3</u>	<u>4990</u>	<u>3,2</u>
	0,016	6,6	5,1	98,4	84,7	16	2,2	6100	4,6
Образцы сравнения (без использования КП)									
4	—	<u>7,3</u>	<u>11,8</u>	<u>94,4</u>	<u>70,4</u>	<u>29</u>	<u>1,2</u>	<u>2550</u>	<u>2,5</u>
		7,0	8,6	96,8	76,2	24	1,4	4980	3,4

Примечание. рН — значение рН 0,1%-й проклеенной волокнистой суспензии перед ее обезвоживанием; С — содержание сухих веществ (волокон и проклеивающих комплексов) в подсеточной воде, удаляемой при обезвоживании проклеенных суспензий и формировании из нее листового материала; СтУ_в и СтУ_{пк} — степень удержания волокон и проклеивающих комплексов в структуре полученного листового материала соответственно, %; Y_1 — впитываемость при одностороннем смачивании, г/м²; Y_2 — степень проклейки по штриховому методу, мм; Y_3 — влагопрочность, %; Y_4 — разрывная длина, м. Содержание КП $R_{пр}$ рассчитано относительно абсолютно сухого волокна.

ляет экономить исходные сырьевые компоненты в количестве 1,5...3,6 %. Кроме того, замена вторичного волокнистого полуфабриката (макулатуры) на первичный (целлюлозу) способствует дополнительной экономии расхода КП, достигающей 20...34 %. При этом целесообразность применения КП объясняется его участием в процессах пептизации, связеобразования, упрочнения и флокуляции. Впервые показано, что использование КП в целлюлозных и макулатурных суспензиях по последовательности 2 способствует смещению протекающего процесса проклейки из традиционного режима гомокоагуляции в более эффективный режим гетероадагуляции. Это имеет важное практическое значение, поскольку обеспечивается получение высококачественных видов бумаги и картона по ресурсосберегающим и экологически безопасным технологиям.

На втором этапе изучали влияние способов применения КП в технологии бумаги и картона и его предпочтительного содержания $R_{пр}$ на свойства проклеенных волокнистых суспензий (целлюлозных и макулатурных) и качество полученных из них образцов бумаги и ЭСК (таблица).

Следует отметить, что по существующей технологии (вариант сравнения), когда используется последовательность 1 и содержание КП в проклеенной волокнистой суспензии превышает 0,050 %, основное назначение КП сводится к обеспечению процесса флокуляции. При этом не

рассматривается участие КП в процессах проклейки волокнистых суспензий и упрочнения полученных из них бумаги и картона.

Установлено, что эффективность применения КП можно повысить путем введения его в волокнистую суспензию в необходимом количестве ($R_{пр}$) по существующей технологии (последовательность 1) и изменения способа его использования по исследуемым технологиям (последовательности 2 и 3).

Результаты исследования (см. таблицу) являются комплексными, поскольку демонстрируют влияние способа применения КП и его предпочтительного содержания в суспензиях на свойства проклеенных волокнистых суспензий (макулатурных и целлюлозных) и качество полученных из них образцов бумаги и ЭСК.

Установлено, что рН проклеенных суспензий находится в нейтральной области: для макулатурных — рН = 6,5...7,2; для целлюлозных — рН = 6,3...7,0. Образцы сравнения (без использования КП) имеют рН = 7,3 и рН = 7,0 для макулатурных и целлюлозных суспензий соответственно. Сохранение нейтральной среды для волокнистых суспензий, проклеенных в присутствии КП, имеет важное практическое значение, поскольку позволяет обеспечить смещение процесса получения продукции из кислой области (рН = 4,8...5,2) [10] в нейтральную (рН = 6,3...7,2) [2, 8].

Таким образом, эффективность использования КП в технологии клееных видов бумаги и картона зависит от последовательности введения его в волокнистые суспензии (макулатурные и целлюлозные) по отношению к КЭ и электролиту и от содержания его в дисперсной системе, а также от комплекса требований, предъявляемых к качеству готовой продукции. Достигаемые положительные эффекты обеспечиваются присутствием в проклеенных волокнистых суспензиях необходимого количества КП, обеспечивающего целенаправленное протекание процессов проклейки, упрочнения, флокуляции и др.

На третьем этапе исследовали свойства мелованных образцов бумаги и картона, отличающихся от известных аналогов структурой (вместо коагулятов присутствовали пептизированные частицы) и рецептурой меловальных паст (вместо комплекса природных соединений использовали одно разработанное синтетическое в виде МКФО). Целлюлозные образцы бумаги моделировали бумагу-основу для мелования марок ДО и ДЧ и покровные слои полиграфического картона марок FBB и SBB, а макулатурные образцы исследовали для определения возможности их использования вместо целлюлозных. Рецептуры приготовленных меловальных паст получали по существующей и предлагаемой технологиям. Они отличались тем, что вместо комплекса природных соединений (4,7 мас. ч.), включающего крахмал окисленный (2,0 мас. ч.), натрийкарбоксиметилцеллюлозу (0,7 мас. ч.) и казеиновый клей (2,0 мас. ч.), содержали синтетическое связующее (3,2 мас. ч.), представляющее собой впервые синтезированный нами МКФО [20].

Мелованные образцы бумаги и картона имели следующие показатели качества: белизну — 85...87 % (норма не менее 85 %), стойкость поверхности к выщипыванию — 2,2...2,4 см (норма не менее 2,2 см) и гладкость — 254...280 с (норма не менее 250 с.)

Следовательно, присутствие слабоосновного КП в структуре образцов клееных видов бумаги и картона способствует повышению (на 3...6 %) печатных свойств мелованных образцов, полученных на их основе. Одной из основных причин является улучшение адгезионных взаимодействий между поверхностью бумаги-основы и картона-основы с компонентами (в особенности пигментами) нанесенного мелованного покрытия.

Выводы

Эффективность применения слабоосновных КП зависит от последовательности введения их в волокнистые суспензии и соотношения КЭ, КП и электролита. Установлено, что использование последовательности «КЭ — КП (расход

0,010...0,15 % относительно абсолютно сухого волокна) — электролит» (разработанная технология) вместо «КЭ — электролит — КП (расход 0,050 % от а. с. в. и более) — электролит» (существующая технология) позволяет участвовать КП не только в процессе флокуляции, но и в формировании новых проклеивающих комплексов в виде мелкодисперсных положительно заряженных пептизированных частиц. Следствием этого является смещение процесса проклейки из традиционного режима гомокоагуляции в более эффективный режим гетероадагуляции, а также повышение (на 5...15 %) гидрофобности и прочности клееных видов бумаги и картона. Увеличение степени удержания волокон от 94,4...96,8 до 98,2...99,7 % и проклеивающих комплексов от 70,4...76,2 до 88,7...92,3 % и одновременное снижение содержания взвешенных веществ в оборотной воде от 8,6...11,8 до 3,0...3,8 мг/л свидетельствует о целесообразности получения высококачественной продукции по разработанной ресурсосберегающей и экологически безопасной технологии.

Улучшению печатных свойств бумаги и картона на 3...6 % способствует дальнейшее их мелование. Для этого необходимо заменить в рецептуре меловальной пасты традиционно применяемый комплекс природных соединений, включающий в себя крахмал окисленный (2,0 мас. ч.), натрийкарбоксиметилцеллюлозу (0,7 мас. ч.) и казеиновый клей (2,0 мас. ч.), на одно синтетическое связующее — МКФО (3,2 мас. ч.).

Список литературы

- [1] Технология целлюлозно-бумажного производства. В 3 т. Т. II. Производство бумаги и картона. Ч. 2. Основные виды и свойства бумаги, картона, фибры и древесных плит. СПб.: Политехника, 2006. 499 с.
- [2] Черная Н.В. Теория и технология клееных видов бумаги и картона. Минск: Изд-во БГТУ, 2009. 394 с.
- [3] Хованский В.В., Дубовый В.К., Кейзер П.М. Применение химических вспомогательных веществ в производстве бумаги и картона. СПб.: Изд-во СПбГТУРП, 2013. 151 с.
- [4] Кожевников С.Ю., Андреева С.Л. Упрочнение бумаги синтетической катионно-анионной полиакриламидной смолой // Химия растительного сырья, 2011. № 2. С. 177–182.
- [5] Лапин В.В., Смоляков А.И. Специализированные виды катионного крахмала для бумажного производства // Целлюлоза. Бумага. Картон, 2000. № 11–12. С. 23–25.
- [6] Осипов П.В. Эффекты синергизма между синтетическими полимерами и катионным крахмалом в макулатурных композициях // Целлюлоза. Бумага. Картон, 2011. № 3. С. 74–77.
- [7] Остапенко А.А., Мороз В.Н., Барбаш В.А., Кожевников С.Ю., Дубовый В.К., Ковернинский И.Н. Повышение качества бумаги из макулатуры химическими функциональными веществами // Химия растительного сырья, 2012. № 1. С. 187–190.
- [8] Черная Н.В., Ламоткин А.И. Проклейка бумаги и картона в кислой и нейтральной средах. Минск: Изд-во БГТУ, 2003. 345 с.

- [9] Черная Н.В. Концептуальное развитие теории и технологии проклейки бумаги и картона гидродисперсиями модифицированной канифоли в режиме гетероадагуляции пептизированных частиц // Полимерные материалы и технологии, 2015. Т. 1. № 1. С. 76–90.
- [10] Мишурина О.А., Ершова О.А. Способы гидрофобизации и упрочнения композиционных целлюлозных материалов из вторичного сырья // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований, 2016. № 10. С. 363–366.
- [11] Гордейко С.А., Жолнерович Н.В., Черная Н.В., Флейшер В.Л., Драпеза А.А., Андриюхова М.В., Макарова Д.С. Повышение прочности тароупаковочной бумаги с использованием азотсодержащих соединений // Труды БГТУ. Химия, технология органических веществ и биотехнология, 2013. № 3. С. 165–168.
- [12] Лирова Б.И., Русинова Е.В. Анализ полимерных композиционных материалов. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2008. 187 с.
- [13] Запольский А.К., Баран А.А. Коагулянты и флокулянты. Ленинград: Химия, 1987. 204 с.
- [14] Берлин А.А., Кисленко В.Н., Соломенцева И.М. Математическое моделирование флокуляции суспензий полиэлектролитами // Коллоидный журнал, 1998. Т. 60. № 5. С. 592–597.
- [15] Kallmes O., Kallmes P., Bishop V. Monitoring flocculation on the paper machine // TAPPI, 1994, v. 77, no. 7, pp. 194–198.
- [16] Лапин В.В. О быстром взаимодействии в системе волокнистая дисперсия — разбавленный раствор катионного полиэлектролита // Исследования в области химии бумаги: сб. тр. ЦНИИБ. М., 1976. № 12. С. 55–63.
- [17] Тесленко В.В., Данилова Д.А., Федюкин А.В., Нехайчук О.Г. Некоторые особенности использования синтетических флокулянтов // Бумажная пром-сть, 1989. № 9. С. 13–14.
- [18] Пузырев С.А., Воробьев О.В., Седова Е.В. Применение катионных флокулянтов в производстве бумаги // Новые технические виды бумаги и картона, 1987. С. 22–27.
- [19] Linolstrom T., Flonen T. The effect of filler particle size on the olry-strenghtening effect of cationic starch wet- and adolition // Nord. PulpandPaperRes. J., 1987, v. 2, no. 4, pp. 142–151.
- [20] Флейшер В.Л., Черная Н.В., Шишаков Е.П., Чернышева Т.В. Способ получения упрочняющей добавки для изготовления бумаги. Пат. № 23441 РБ, заявитель и патентообладатель УО «Белорусский государственный технологический университет», 2018.
- [21] Копылович М.Н., Радион Е.В., Баев А.К. Распределение различных форм алюминия (III) и меди (II) в растворах и схема процесса гетероядерного гидроксокомплексобразования // Координационная химия, 1995. Т. 21, № 1. С. 66–71.
- [22] Фролов Ю.Г., Гродский А.С. Лабораторные работы и задачи по коллоидной химии. М.: Химия, 1986. 186 с.
- [23] Примаков С.Ф., Миловзоров В.П., Кухникова М.С. Лабораторный практикум по целлюлозно-бумажному производству. М.: Лесная пром-сть, 1980. 168 с.
- [24] Бондарев А.И. Производство бумаги и картона с покрытием. М.: Лесная пром-сть, 1985. 192 с.
- [25] Карпова С.В., Черная Н.В. Изучение свойств мелованной бумаги при замене природного связующего на новое синтетическое // Химия и химическая технология переработки растительного сырья: Материалы докладов Междунар. науч.-техн. конф., 10–12 октября 2018 г., Минск, БГТУ. Минск: Изд-во БГТУ, 2018. С. 187–191.
- [26] Chernaya N.V., Fleisher V.L., Zholnerovich N.V. The creation and implementation of the resource-conserving technology of paper and paperboard sizing with hydrodispersions of modified rosin in mode of hetero-adagulation of peptized particles // PNRPU. Appliedecology. Urbandevelopment, 2017, no. 2, pp.87–101. DOI: 10.15593/2409-5125/2017.02.08

Сведения об авторах

Черная Наталья Викторовна  — д-р техн. наук, профессор кафедры химической переработки древесины УО «Белорусский государственный технологический университет», chornaya@belstu.by

Шашок Жанна Станиславовна — д-р техн. наук, профессор кафедры полимерных композиционных материалов УО «Белорусский государственный технологический университет», shashok@belstu.by

Карпова Светлана Валерьевна — ассистент кафедры химической переработки древесины УО «Белорусский государственный технологический университет», aspirantura.bgtu@tut.by

Усс Елена Петровна — канд. техн. наук, доцент кафедры полимерных композиционных материалов УО «Белорусский государственный технологический университет», uss@belstu.by

Мисюров Олег Александрович — аспирант кафедры химической переработки древесины УО «Белорусский государственный технологический университет», omisurov@mail.ru

Поступила в редакцию 17.01.2022.

Одобрено после рецензирования 10.03.2022.

Принята к публикации 13.05.2022.

APPLICATION OF WEAK CATIONIC POLYELECTROLYTES IN PAPER AND CARDBOARD EFFICIENCY IMPROVEMENT TECHNOLOGY

N.V. Chernaya✉, Zh.S. Shashok, S.V. Karpova,
E.P. Uss, O.A. Misyurov

Belarusian State Technological University, 13a, Sverdlova st., 220006, Minsk, Republic of Belarus

chornaya@belstu.by

The article considers the effect of weak cationic polyelectrolytes on the structure- and paper-forming properties of glued fibrous suspensions and the quality of glued and coated paper and cardboard samples obtained from them. It is shown for the first time that the efficiency of using cationic polyelectrolytes increases by 2...3 times due to a change in the sequence of its introduction into glued fibrous suspensions (cellulose and waste paper) in relation to rosin emulsion and electrolyte, as well as by «correction» their dosages. It is found that the use of the developed technology allows cationic polyelectrolytes to participate not only in the process of flocculation, but also in the formation of new sizing complexes in the form of finely dispersed positively charged peptized particles. It is revealed that the replacement of the sizing process in the homocoagulation mode with a more efficient mode of heteroadagulation of peptized particles due to the use of weakly basic cationic polyelectrolytes provides an increase in hydrophobicity and strength of the glued types of paper and cardboard. The expediency of using cationic polyelectrolytes to obtain high-quality products in the developed resource-saving and ecologically safe technology of glued types of paper and cardboard is substantiated based on the established increase in the degree of retention of fibers and sizing complexes and the simultaneous decrease in the content of suspended solids in recycled water. It is determined that the coating of glued paper and cardboard samples obtained with weakly basic cationic polyelectrolytes improves the printing properties of the resulting products. Recommendations are given for replacing the traditionally used complex of natural compounds in the coating paste formulation, including oxidized starch (2,0 parts by weight), sodium carboxymethyl cellulose (0,7 parts by weight) and casein glue (2,0 parts by weight), for one synthetic binder — modified urea-formaldehyde oligomer (3,2 parts by weight).

Keywords: sizing, homocoagulation, heteroadagulation, hardening, structure formation, flocculation

Suggested citation: Chernaya N.V., Shashok Zh.S., Karpova S.V., Uss E.P., Misyurov O.A. *Razrabotka sposoba povysheniya effektivnosti primeneniya slaboosnovnykh kationnykh polielektrolitov v tekhnologii bumagi i kartona* [Application of weak cationic polyelectrolytes in paper and cardboard efficiency improvement technology]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 3, pp. 105–114. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-105-114

References

- [1] *Tekhnologiya tsellyulozno-bumazhnogo proizvodstva. V 3 t. T. II. Proizvodstvo bumagi i kartona. CH. 2. Osnovnyye vidy i svoystva bumagi, kartona, fibry i drevesnykh plit* [Pulp and paper technology. In 3 vol. Vol. II. Manufacture of paper and cardboard. Part 2. The main types and properties of paper, cardboard, fiber and wood-based panels]. Sankt-Peterburg: Politekhnik, 2006, 499 p.
- [2] Chernaya N.V. *Teoriya i tekhnologiya kleyenykh vidov bumagi i kartona* [Theory and technology of glued types of paper and cardboard]. Minsk: BSTU Publ., 2009, 394 p.
- [3] Khovanskiy V.V., Dubovyy V.K., Keyzer P.M. *Primeneniye khimicheskikh vspomogatel'nykh veshchestv v proizvodstve bumagi i kartona* [The use of chemical excipients in the production of paper and cardboard]. Sankt-Peterburg: SPbGTURP, 2013, 151 p.
- [4] Kozhevnikov S.Yu., Andreyeva S.L. *Uprochneniye bumagi sinteticheskoy kationno-anionnoy poliakrilamidnoy smoly* [Strengthening paper with synthetic cationic-anionic polyacrylamide resin]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of vegetable raw materials], 2011, no. 2, pp. 177–182.
- [5] Lapin V.V., Smolyakov A.I. *Spetsializirovannyye vidy kationnogo krakhmala dlya bumazhnogo proizvodstva* [Specialized types of cationic starch for paper production]. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton* [Cellulose. Paper. Cardboard], 2000, no. 11–12, pp. 23–25.
- [6] Osipov P.V. *Effekty sinergizma mezhdu sinteticheskimi polimerami i kationnym krakhmalom v makulaturnykh kompozitsiyakh* [Synergistic effects between synthetic polymers and cationic starch in waste paper compositions]. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton* [Cellulose. Paper. Cardboard], 2011, no. 3, pp. 74–77.
- [7] Ostapenko A.A., Moroz V.N., Barbash V.A., Kozhevnikov S.YU., Dubovyy V.K., Koverninskiy I.N. *Povysheniye kachestva bumagi iz makulatury khimicheskimi funktsional'nymi veshchestvami* [Improving the quality of paper from waste paper by chemical functional substances]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of vegetable raw materials], 2012, no. 1, pp. 187–190.
- [8] Chernaya N.V., Lamotkin A.I. *Prokleyka bumagi i kartona v kisloy i neytral'noy sredakh* [Sizing paper and cardboard in acidic and neutral environments]. Minsk: BGTU, 2003, 345 p.
- [9] Chernaya N.V. *Kontseptual'noye razvitiye teorii i tekhnologii prokleyki bumagi i kartona gidrodispersiyami modifitsirovannoy kanifoli v rezhime geteroadagulyatsii peptizirovannykh chastits* [Conceptual development of the theory and technology of gluing paper and cardboard with hydrodispersions of modified rosin in the mode of heteroadagulation of peptized particles]. *Polimernyye materialy i tekhnologii* [Polymer materials and technologies], 2015, vol. 1, no. 1, pp. 76–90.
- [10] Mishurina O.A., Yershova O.A. *Sposoby gidrofobizatsii i uprochneniya kompozitsionnykh tsellyuloznykh materialov iz vtorichnogo syr'ya* [Methods of hydrophobization and hardening of composite cellulose materials from secondary raw materials]. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International J. of Applied and Fundamental Research], 2016, no. 10, pp. 363–366.
- [11] Gordeyko S.A., Zholnerovich N.V., Chernaya N.V., Fleysher V.L., Drapeza A.A., Andryukhova M.V., Makarova D.S. *Povysheniye prochnosti tarupakovoy bumagi s ispol'zovaniyem azotsoderzhashchikh soyedineniy* [Increasing the

- strength of packaging paper using nitrogen-containing compounds]. Trudy BG TU. Khimiya, tekhnologiya organicheskikh veshchestv i biotekhnologiya [Proceedings of BSTU. Chemistry, technology of organic substances and biotechnology], 2013, no. 3, pp. 165–168.
- [12] Lirova B.I., Rusinova Ye.V. *Analiz polimernykh kompozitsionnykh materialov* [Analysis of polymer composite materials]. Yekaterinburg: Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta, 2008, 187 p.
- [13] Zapol'skiy A.K., Baran A.A. *Koagulyanty i flokulyanty* [Coagulants and flocculants]. Leningrad: Khimiya, 1987, 204 p.
- [14] Berlin A.A., Kislenko V.N., Solomentseva I.M. *Matematicheskoye modelirovaniye flokulyatsii suspenziy poli-elektrolitami* [Mathematical modeling of flocculation of suspensions with poly-electrolytes]. Kolloidnyy zhurnal [Colloid Journal], 1998, vol. 60, no. 5, pp. 592–597.
- [15] Kallmes O., Kallmes P., Bishop B. Monitoring flocculation on the paper machine. TAPPI, 1994, vol. 77, no. 7, pp. 194–198.
- [16] Lapin V.V. *O bystrom vzaimodeystvii v sisteme voloknistaya dispersiya — razbavlenyy rastvor kationnogo polielektrolita* [On fast interaction in the system fibrous dispersion — diluted solution of cationic polyelectrolyte]. Issledovaniya v oblasti khimii bumagi: sbornik trudov TSNIIB [Research in paper chemistry: Proceedings of the TsNIIB]. Moskva, 1976, no. 12, pp. 55–63.
- [17] Teslenko V.V., Danilova D.A., Fedyukin A.V., Nekhaychuk O.G. *Nekotoryye osobennosti ispol'zovaniya sinteticheskikh flokulyantov* [Some features of the use of synthetic flocculants]. Bumazhnaya promyshlennost' [Paper industry], 1989, no. 9, pp. 13–14.
- [18] Puzyrev S.A., Vorob'yev O.V., Sedova Ye.V. *Primeneniye kationnykh flokulyantov v proizvodstve bumagi* [The use of cationic flocculants in paper production]. Novyye tekhnicheskiye vidy bumagi i kartona [New technical types of paper and cardboard], 1987, pp. 22–27.
- [19] Linolstrom T., Flonen T. The effect of filler particle size on the olry-strenghtening effect of cationic starch wet- and adolition. Nord. Pulpand Paper Res. J., 1987, v. 2, no. 4, pp. 142–151.
- [20] Fleysher V.L., Chernaya N.V., Shishakov Ye.P., Chernysheva T.V. *Sposob polucheniya uprochnyayushchey dobavki dlya izgotovleniya bumagi* [A method of obtaining a hardening additive for the manufacture of paper]. Patent RB, no. 23441, 2018.
- [21] Kopylovich M.N., Radion Ye.V., Bayev A.K. *Raspredeleye razlichnykh form alyuminiya (III) i medi (II) v rastvorakh i skhema protsessa geteroyadernogo gidroksokompleksoobrazovaniya* [Distribution of various forms of aluminum (III) and copper (II) in solutions and the scheme of the process of heteronuclear hydroxocomplexation]. Koordinatsionnaya khimiya [Coordination chemistry], 1995, v. 21, no. 1, pp. 66–71.
- [22] Frolov Yu.G., Grodskiy A.S. *Laboratornyye raboty i zadachi po kolloidnoy khimii* [Laboratory work and tasks in colloidal chemistry]. Moscow, Khimiya, 1986, 186 p.
- [23] Primakov S.F., Milovzorov V.P., Kukhnikova M.S. *Laboratornyy praktikum po tsellyulozno-bumazhnomu proizvodstvu* [Laboratory workshop on pulp and paper production]. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1980, 168 p.
- [24] Bondarev A.I. *Proizvodstvo bumagi i kartona s pokrytiyem* [Manufacture of coated paper and board]. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1985, 192 p.
- [25] Karpova S.V., Chernaya N.V. *Izucheniye svoystv melovannoy bumagi pri zamene prirodnogo svyazuyushchego na novoye sinteticheskoye* [Studying the Properties of Coated Paper when Replacing a Natural Binder with a New Synthetic]. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya pererabotki rastitel'nogo syr'ya: materialy dokladov Mezhdunar. nauchno-tekhn. konf. [Chemistry and Chemical Technology of Plant Raw Material Processing: Proc. Int. Science and Technology Conf.]. Minsk: BSTU, 2018, pp. 187–191.
- [26] Chernaya N.V., Fleisher V.L., Zholnerovich N.V. The creation and implementation of the resource-conserving technology of paper and paperboard sizing with hydro-dispersions of modified rosin in mode of heteroadagulation of peptized particles. PNRPU. Appliedecology. Urbandevelopment, 2017, no. 2, pp. 87–101. DOI: 10.15593/2409-5125/2017.02.08

Authors' information

Chernaya Natal'ya Viktorovna  — Dr. Sci. (Tech.), Professor of Department of Chemical Processing of Wood of the Belarusian State Technological University, chornaya@belstu.by

Shashok Zhanna Stanislavovna — Dr. Sci. (Engineering), Professor of Department of Polymer Composite Materials of the Belarusian State Technological University, shashok@belstu.by

Karpova Svetlana Valerievna — Assistant of Department of Chemical Processing of Wood of Belarusian State Technological University, aspirantura.bgtu@tut.by

Uss Elena Petrovna — Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of Department of Polymer Composite Materials of Belarusian State Technological University, uss@belstu.by

Misyurov Oleg Aleksandrovich — Pg. of Department of Chemical Processing of Wood of Belarusian State Technological University, omisyurov@mail.ru

Received 17.01.2022.

Approved after review 10.03.2022.

Accepted for publication 13.05.2022.

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

ГЛОБАЛЬНОСТЬ РАДИОВИДИМОСТИ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Ю.С. Луценко¹, В.М. Поливников¹, А.А. Малашин²✉

¹АО «ЦНИИмаш», 141070, Россия, г. Королев, Московская обл., ул. Пионерская, д. 4

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

malashin@mgul.ac.ru

Рассмотрены несколько вариантов аналитических методов расчета глобальности видимости, что позволяет оценить возможности оперативного управления космическими аппаратами и получения целевой информации, загрузку наземных средств, объем передаваемой (принимаемой) информации и эффективность систем. Приведены вывод соотношений расчета коэффициента глобальности, графики его изменения для низкоорбитальных космических аппаратов, оценка точности полученных соотношений. Показано, что графики глобальности видимости позволяют на начальном этапе проектирования легко определиться с оптимальными характеристиками пространственно-временных структур создаваемых систем. Получены оценки точности результатов с использованием «точных» моделей полета космических аппаратов, подтверждающие рекомендации по их практическому применению. Результаты разработки представляют практический интерес при проектировании любых космических систем космических аппаратов на круговых орбитах.

Ключевые слова: зона видимости, наземные средства, коэффициент глобальности, проектирование

Ссылка для цитирования: Луценко Ю.С., Поливников В.М., Малашин А.А. Глобальность радиовидимости низкоорбитальных космических аппаратов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 3. С. 115–124. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-115-124

Оптимизация проектирования систем орбитальных и целевых группировок космических аппаратов (КА), наземных средств управления и приема целевой информации невозможна без учета глобальности видимости КА наземными средствами. Оценка этого параметра традиционно производится с использованием численных методов расчета на длительных интервалах времени полета КА и не позволяет наглядно представить связь параметров траекторий и эффективность систем.

Исследования по проблемам проектирования систем группировок КА актуальны в области теоретических [1–8] и практических [9–14] аспектов решаемых задач. Вопросы управления космическими группировками имеют важное значение в данных исследованиях [15–25].

В процессе управления КА и приема от них целевой информации особым параметром является время, когда соблюдаются условия взаимной видимости КА и пункта приема-передачи информации. Этот параметр позволяет рационально (оптимально) проектировать космические системы с точки зрения оперативности и надежности управления, объема передаваемой и принимаемой целевой информации, в том числе количества и мест установки наземных средств управления, что особенно важно при отсутствии космических систем ретрансляции [1]. Одним

из главных показателей, позволяющих оценить характеристики космических систем, служит коэффициент глобальности нахождения КА в зоне радиовидимости (ЗРВ) [2, 3] наземного пункта.

Под коэффициентом глобальности ($K_{\text{гл}}$) наблюдения КА будем понимать отношение суммы периодов времени нахождения его в ЗРВ средства управления на выбранном интервале времени T_s к его продолжительности

$$K_{\text{гл}} = \frac{\sum \tau_i}{T_s}, \quad (1)$$

где τ_i — продолжительность интервала времени видимости КА с наземного пункта на i -м витке;

T_s — продолжительность интервала наблюдения за КА.

В настоящее время для оценки коэффициента глобальности широко применяется метод численного моделирования траекторий полета КА на временном интервале в несколько суток. При этом используются упрощенные модели фигуры Земли и действующих на КА сил, что позволяет рассчитать эти данные с необходимой для практических целей точностью. Недостатки такого подхода очевидны — отсутствие наглядной взаимосвязи пространственно-временных структур (ПВС) КА и наземной инфраструктуры, что часто не позволяет в полной мере использовать потенциал каждой компоненты создаваемых систем КА [1]

Несомненный интерес представляют соотношения для расчета коэффициента глобальности нахождения КА в ЗРВ наземных пунктов (далее — коэффициент глобальности), позволяющие на первоначальном этапе проектирования космических систем рационально выбирать их ПВС.

Рассмотрим задачу нахождения коэффициента глобальности для КА на околокруговой орбите. Примем поле притяжения Земли центральным, модель фигуры Земли — сфера, ЗРВ — круг на поверхности Земли с центром в точке нахождения наземного пункта (НП) и радиусом r , зависящим от высоты h орбиты КА, ограничения по углу места γ и радиуса Земли R

$$r = R \left(\arccos \left(\frac{R}{R+h} \cos \gamma \right) - \gamma \right). \quad (2)$$

На каждом витке подспутниковая точка [2] движется по касательной к окружности с центром в северном полюсе N радиуса R_N (в градусах)

$$R_N = |90^\circ - i|, \quad (3)$$

где i — наклонение орбиты КА.

На каждом витке видимость есть в точках на линии, которая находится внутри окружности S_K с центром в точке K — точке нахождения НП. Интересующий нас участок поверхности Земли — плоскость. Получаем два варианта алгоритма расчета коэффициента глобальности. В первом варианте вращением Земли при нахождении КА в ЗРВ пренебрегаем, что вполне допустимо для низкоорбитальных КА. Во втором варианте учтем вращение Земли во время нахождения КА в ЗРВ.

Задача № 1

Имеем следующую геометрическую задачу (см. рис. 1). На плоскости расположены две окружности S_K и S_N радиусами R_K и R_N соответственно, расстояние между центрами K и N окружностей равно d . Проведем прямую NC под углом ψ к прямой KN , точка C — ее пересечение с окружностью S_N . Далее построим касательную к окружности S_N в этой точке. Обозначим за l_ψ длину отрезка этой касательной, заключенного внутри окружности S_K . За время одного витка доля времени, в течение которого КА находится в ЗРВ, составляет $l_\psi/2\pi R$. Нас интересуют только такие углы ψ , при которых соответствующая касательная пересекает окрестность S_K . Введем обозначения: $d = |KN|$, $l_\psi = |AB|$.

Если вся окружность S_N лежит внутри окружности S_K (т. е. $d \leq R_K - R_N$), то это верно для любых $0 \leq \psi \leq 2\pi$. Тогда для заданных R_K , R_N и d можно вычислить интеграл $K_{гр}$ (коэффициент глобальности — среднеинтегральная по окружности S_N доля нахождения КА в ЗРВ на витке)

$$K_{гр} = \frac{1}{4\pi^2 R} \int_0^{2\pi} l_\psi d\psi = \frac{1}{2\pi^2 R} \int_0^\pi l_\psi d\psi. \quad (4)$$

Если же окружности пересекаются либо одна из них полностью лежит вне другой, то максимальный угол ψ соответствует внешней общей касательной окружностей. Тогда

$$\begin{aligned} |KG| &= |KH| - |GH| = R_K - R_N = \\ &= |KH| \sin(\psi - 90^\circ) = d \cos \psi. \end{aligned} \quad (5)$$

$$\psi = \arccos \frac{R_K - R_N}{d}. \quad (6)$$

$$K_{гр} = \frac{1}{2\pi^2 R} \int_0^{\arccos \frac{R_K - R_N}{d}} l_\psi d\psi. \quad (7)$$

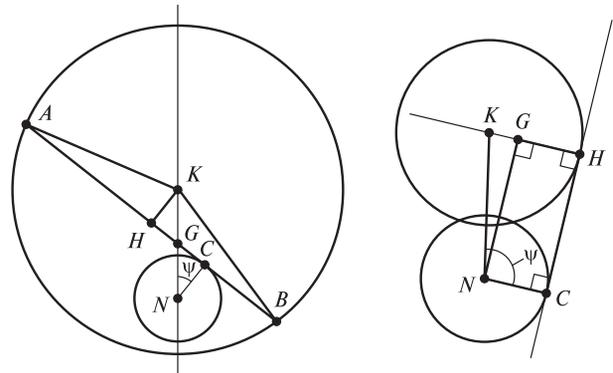


Рис. 1. Варианты взаимного положения подспутниковых точек и наземного пункта

Fig. 1. Variants of the sub-satellite relative position points and the ground point

Найдем l_ψ . Опустим из точки K перпендикуляр KH на прямую AB . Тогда AKB — равнобедренный треугольник с высотой KH и основанием AB

$$\begin{aligned} l_\psi = |AB| &= 2|AH| = 2\sqrt{|AK|^2 - |KH|^2} = \\ &= 2\sqrt{R_A^2 - |KH|^2} \end{aligned} \quad (8)$$

Необходимо найти длину перпендикуляра KH . Возможны два варианта.

1. Точки A и B лежат по разные стороны от прямой AB (см. рис. 1). Тогда треугольники KHG и NCG подобны, и

$$\frac{|KH|}{|NC|} = \frac{|KG|}{|GN|}, \quad (9)$$

$$|KH| = \frac{|KG| \cdot |NC|}{|GN|} = \frac{\left(d - \frac{R_B}{\cos \phi} \right) R_B}{\frac{R_B}{\cos \phi}} = d \cos \phi - R_B. \quad (10)$$

2. Точки K и N лежат по одну сторону от прямой AB (рис. 2).

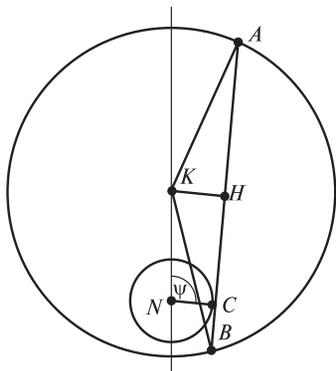


Рис. 2. Второй вариант взаимного расположения точек
Fig. 2. The second variant of the mutual arrangement of points

Тогда точки K, H, C, N образуют трапецию с двумя прямыми углами (рис. 3 и 4).

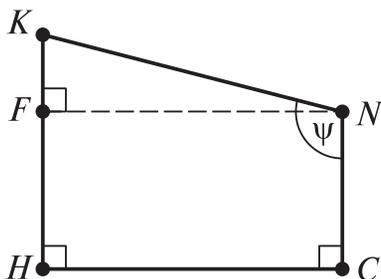


Рис. 3. Вариант трапеции 1
Fig. 3. Trapeze variant 1

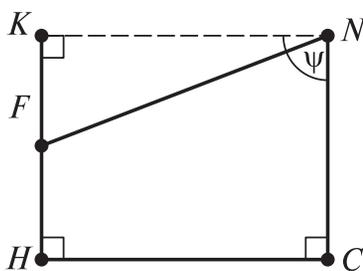


Рис. 4. Вариант трапеции 2
Fig. 4. Trapeze variant 2

Если угол $\psi > 90^\circ$, то

$$|KH| = |KF| + |FH| = |KN| \sin(\psi - 90^\circ) + |NC| = -d \cdot \cos\psi + R_N. \quad (11)$$

Если угол $\psi \leq 90^\circ$, то

$$|KH| = |FH| - |FK| = |NC| - |KN| \cos\psi = R_N - d \cdot \cos\psi. \quad (12)$$

В итоге, во всех случаях

$$|KH|^2 = (d \cdot \cos\psi - R_N)^2, \quad (13)$$

$$l_\psi = 2\sqrt{R_K^2 - |KH|^2} = 2\sqrt{R_K^2 - (d \cos\psi - R_N)^2}. \quad (14)$$

Если $d > |R_K - R_N|$, то

$$K_{\text{гл}} = \frac{1}{2\pi^2 R} \int_0^{\arccos \frac{R_K - R_N}{d}} l_\psi d\psi. \quad (15)$$

Если $d < |R_K - R_N|$, то

$$K_{\text{гл}} = \frac{1}{2\pi^2 R} \int_0^\pi l_\psi d\psi. \quad (16)$$

Принято, что $R_K \geq R_N$. Однако формулы верны и для обратного случая.

Рассматривая участки поверхности Земли вблизи полюса и НП как сферы, можно свести задачу к решению сферических треугольников (рис. 5).

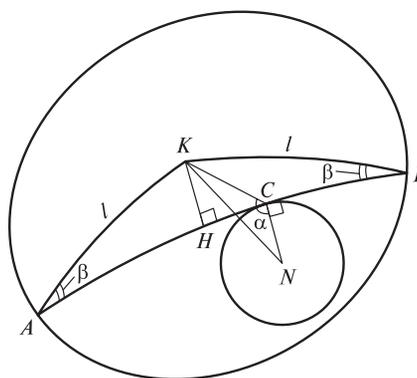


Рис. 5. Участок сферической поверхности
Fig. 5. Plot of a spherical surface

Пусть $\Delta\varphi = \frac{d}{R}$ — расстояние между северным

полюсом и НП, ψ — разность между долготами НП и самой северной точки орбиты, $l = \frac{r}{R}$ — радиус ЗРВ в угловой мере.

Здесь и далее все дуги измеряются в радианах (рис. 6).

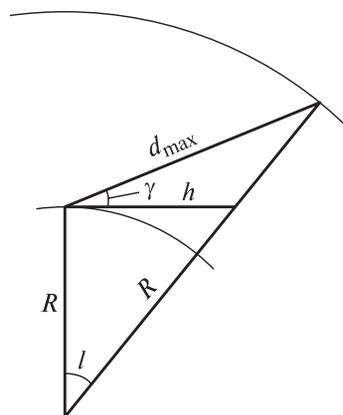


Рис. 6. Связь между радиусом зоны радиовидимости, высотой орбиты космического аппарата, углом места и наклонной дальностью

Fig. 6. Relationship between the radius of the radio visibility zone, the height of the orbit of the spacecraft, the elevation angle and the slant range

Величину l можно вычислить [4] по формуле

$$l = \arccos\left(\frac{R}{R+h} \cos \gamma\right) - \gamma. \quad (17)$$

Если есть ограничение по наклонной дальности d_{\max} , то

$$l = \arccos\left(\frac{R^2 + (R+h)^2 - d_{\max}^2}{2Rh}\right). \quad (18)$$

$$\begin{aligned} s(\psi) = KC &= \arccos(\cos(KN) \cos(CN) + \sin(KN) \sin(CN) \cos(\angle KNC)) = \\ &= \arccos\left(\cos(\Delta\varphi) \cos\left(\left|\frac{\pi}{2} - i\right|\right) + \sin(\Delta\varphi) \sin\left(\left|\frac{\pi}{2} - i\right|\right) \cos(\psi)\right) = \\ &= \arccos(\cos(\Delta\varphi) \sin(i) + \sin(\Delta\varphi) |\cos(i)| \cos(\psi)); \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \alpha(\psi) = \angle KCN &= \arctg\left(\frac{2 \sin(KN)}{\operatorname{tg} \frac{\angle KNC}{2} (CN + KN) + \operatorname{ctg} \frac{\angle KNC}{2} \sin(CN - KN)}\right) = \\ &= \arctg\left(\frac{2 \sin(\Delta\varphi)}{\operatorname{tg} \frac{\psi}{2} \sin\left(\left|\frac{\pi}{2} - i\right| + \Delta\varphi\right) + \operatorname{ctg} \frac{\psi}{2} \sin\left(\left|\frac{\pi}{2} - i\right| - \Delta\varphi\right)}\right). \end{aligned} \quad (20)$$

Далее рассмотрим сферический треугольник KCA , где $AK = l$, $KC = s(\psi)$, $\angle KCA = \left|\alpha(\psi) - \frac{\pi}{2}\right|$.

Из сферической теоремы синусов [4] следует

$$\begin{aligned} \beta(\psi) = \angle KAC &= \arcsin \frac{\sin KC \sin \angle KCA}{\sin AK} = \\ &= \arcsin \frac{\sin s(\psi) \sin \left|\alpha(\psi) - \frac{\pi}{2}\right|}{\sin AK} = \\ &= \arcsin \frac{\sin s(\psi) |\cos \alpha(\psi)|}{\sin l}. \end{aligned} \quad (21)$$

При этом, если $\left|\frac{\sin s(\psi) |\cos \alpha(\psi)|}{\sin l}\right| > 1$, то вели-

чина $\beta(\psi)$ не определена, на данном витке КА не проходит через ЗРВ.

Опустим в равнобедренном сферическом треугольнике AKB высоту KH . Она будет являться медианой ($AH = HB$). Рассмотрим прямоугольный сферический треугольник AKH .

По первой формуле тангенсов следует

$$\begin{aligned} AH &= \arctg(\operatorname{tg}(AK) \cos \angle KAH) = \\ &= \arctg(\operatorname{tg}(l) \cos \beta(\psi)) \end{aligned} \quad (22)$$

Длина траектории подспутниковой точки, находящейся внутри ЗРВ

$$L(\psi) = \frac{l_\psi}{R} = AB = 2AH = 2 \arctg(\operatorname{tg}(l) \cos \beta(\psi)). \quad (23)$$

Пусть A и B — точки входа и выхода КА из ЗРВ, C — самая северная подспутниковая точка орбиты КА.

Рассмотрим сферический треугольник KCN , где $KN = \Delta\varphi$, $CN = \left|\frac{\pi}{2} - i\right|$, $\angle KNC = \psi$.

Тогда, применяя сферическую теорему косинусов [3], получаем

Алгоритм нахождения величины $L(\psi)$:

$$s(\psi) = \arccos(\cos(\Delta\varphi) \sin(i) + \sin(\Delta\varphi) |\cos(i)| \cos(\psi)); \quad (24)$$

$$\alpha(\psi) = \arctg \frac{2 \sin(\Delta\varphi)}{\operatorname{tg} \frac{\psi}{2} \sin\left(\left|\frac{\pi}{2} - i\right| + \Delta\varphi\right) + \operatorname{ctg} \frac{\psi}{2} \sin\left(\left|\frac{\pi}{2} - i\right| - \Delta\varphi\right)}; \quad (25)$$

$$\beta(\psi) = \arcsin \frac{\sin s(\psi) |\cos \alpha(\psi)|}{\sin l}; \quad (26)$$

$$L(\psi) = 2 \arctg(\operatorname{tg}(l) \cos \beta(\psi)) \quad (27)$$

или $L(\psi) = 0$, если величина $\beta(\psi)$ не определена.

Если время одного витка КА равно $T(c)$, то угол ψ за один оборот изменяется на величину $\delta = \frac{2\pi T}{86400}$. За время одного витка доля времени,

в течение которого КА находится в ЗРВ, составляет $\frac{L(\psi)}{2\pi}$. Чтобы найти долю времени, в течение

которого КА находится в ЗРВ, для N оборотов нужно найти сумму

$$K_{\text{гр}} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{L(\psi + k\delta)}{2\pi}. \quad (28)$$

Если $N \gg 1$, можно записать среднеинтегральное значение

$$\begin{aligned} K_{\text{гр}} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{L(\psi)}{2\pi} d\psi = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{2\pi} L(\psi) d\psi = \\ &= \frac{1}{2\pi^2} \int_0^\pi L(\psi) d\psi. \end{aligned} \quad (29)$$

Задача № 2

Учтем вращение Земли при нахождении КА в ЗРВ НП. Пусть A_1 — подспутниковая точка, соответствующая моменту входа КА в ЗРВ, A_2 — моменту выхода из ЗРВ. При этом в момент входа КА в ЗРВ НП находится в точке K_1 , в момент выхода в точке K_2 , высоты, соответственно — K_1H_1 и K_2H_2 (рис. 7).

$$A_1H_1 = \frac{L(\psi_1)}{2}, \quad A_2H_2 = \frac{L(\psi_2)}{2}. \quad (30)$$

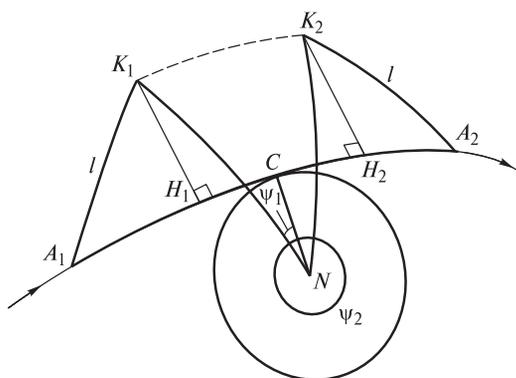


Рис. 7. Прохождение космического аппарата через зону радиовидимости с учетом вращения Земли
 Fig. 7. The passage of the spacecraft through the radio visibility zone, taking into account the rotation of the Earth

Рассмотрим направленные дуги на линии траектории как одномерные векторы со стандартными операциями сложения и вычитания. За положительное направление возьмем направление движения подспутниковой точки. Искомая величина — длина дуги A_1A_2 . Соответствующий вектор равен

$$\overline{A_1A_2} = \overline{A_1H_1} + \overline{H_1C} + \overline{CH_2} + \overline{H_2A_2}. \quad (31)$$

Чтобы найти другие векторы, введем новую величину. Вернемся к рис. 5 и обозначим $Q(\psi) = |HC|$. Для нахождения этой величины рассмотрим прямоугольный сферический треугольник KHC . В нем по предыдущим выкладкам известны KC и $\angle KCH$.

По первой формуле тангенсов:

$$Q(\psi) = |HC| = \arctg\left(\operatorname{tg}(|KC|)\cos\angle KCH\right) = \arctg\left(\operatorname{tg}(s(\psi))\cos\left(\alpha(\psi) - \frac{\pi}{2}\right)\right). \quad (32)$$

Тогда

$$|H_1C| = \frac{Q(\psi_1)}{2}, \quad |H_2C| = \frac{Q(\psi_2)}{2}. \quad (33)$$

Величины (модули) всех векторов из равенства (31) известны.

Таким образом

$$\begin{aligned} \hat{L}(\psi_1, \psi_2) &= A_1A_2 = \\ &= \pm|A_1H_1| \pm |H_1C| \pm |CH_2| \pm |H_2A_2| = \\ &= \pm \frac{L(\psi_1)}{2} \pm \frac{Q(\psi_1)}{2} \pm \frac{Q(\psi_2)}{2} \pm \frac{L(\psi_2)}{2}. \end{aligned} \quad (34)$$

Знаки перед каждым из слагаемых зависят от направления соответствующих векторов, которые, в свою очередь, зависят от положения НП в соответствующие моменты времени относительно подспутниковой траектории. За счет выбора положительного направления оси по движению КА векторы A_1A_2 , A_1H_1 и H_2A_2 должны учитываться в выражении (34) со знаком «+». Действительно, вход КА в ЗРВ соответствует его движению к НП, а выход — движению от НП. Направления векторов H_1C и CH_2 зависят от соответствующих углов: H_1C положительно направлен при $0 < \psi_1 \leq \pi$ и отрицательно — при $\pi < \psi_1 < 2\pi$.

Вектор $CH_2 = -H_2C$ аналогично отрицательно направлен при $0 < \psi_2 < \pi$ и положительно — при $\pi < \psi_2 < 2\pi$. При граничных значениях (0, π , 2π) соответствующие значения Q равны нулю.

Таким образом, все знаки в равенстве (34) однозначно определены. Введение вспомогательной функции

$$\chi(\psi) = \begin{cases} 1, & 0 < \psi < \pi \\ -1, & \pi < \psi < 2\pi \end{cases} \quad (35)$$

позволяет для $\hat{L}(\psi_1, \psi_2)$ записать

$$\begin{aligned} \hat{L}(\psi_1, \psi_2) &= \frac{L(\psi_1)}{2} + \frac{Q(\psi_1)}{2}\chi(\psi_1) - \\ &- \frac{Q(\psi_2)}{2}\chi(\psi_2) + \frac{L(\psi_2)}{2}. \end{aligned} \quad (36)$$

Для расчетов необходимо знать углы ψ_1 , ψ_2 или моменты времени, в которые КА входит и покидает ЗРВ. Если же эти моменты и скорость движения КА известны, то задача нахождения длины участка траектории КА, находящегося в ЗРВ, становится тривиальной.

Полученные выражения неудобны для быстрой оценки коэффициента глобальности существующих и проектируемых систем, однако позволяют сделать вывод о том, что максимума коэффициента глобальности можно достичь при совпадении широты НП и наклона орбиты КА. Реальное расположение НП, по данным работы [5], и зоны радиовидимости КА научного и социально-экономического назначения (НСЭН) на поверхности Земли в пределах России показано на рис. 8.

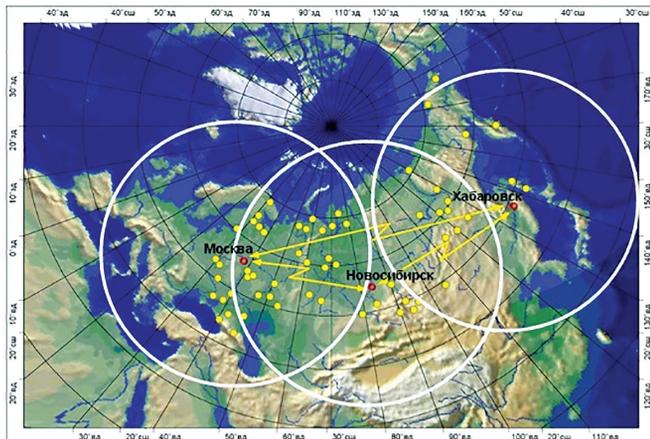


Рис. 8. Зоны радиовидимости наземного пункта (управление и прием целевой информации) космического аппарата научного и социально-экономического назначения

Fig. 8. Zones of a ground point (control and reception of target information) radio visibility of a spacecraft for scientific and socio-economic purposes

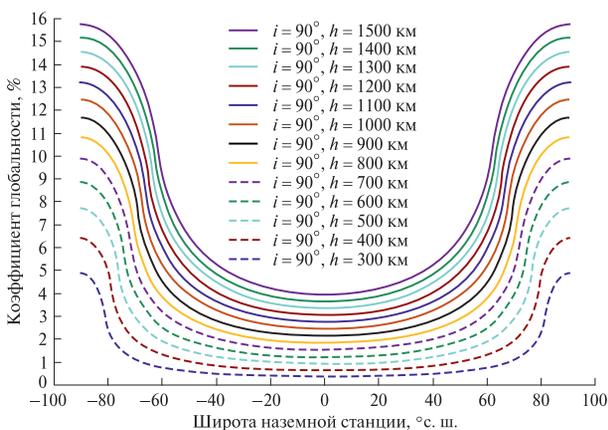


Рис. 9. Зависимость изменения коэффициента глобальности от широты наземной станции для полярных орбит космических аппаратов

Fig. 9. Dependence of the change in the globality coefficient on the latitude of the ground station for polar orbits of spacecraft

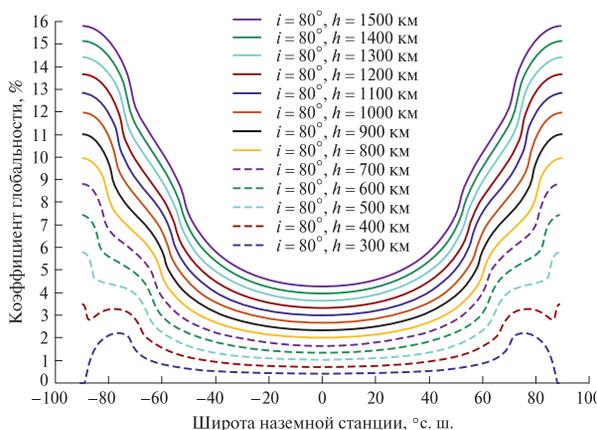


Рис. 11. Зависимость изменения коэффициента глобальности от широты наземной станции для орбит космических аппаратов с наклоном 80 град

Fig. 11. Dependence of the change in the globality coefficient on the latitude of the ground station for spacecraft orbits with an inclination of 80 degrees

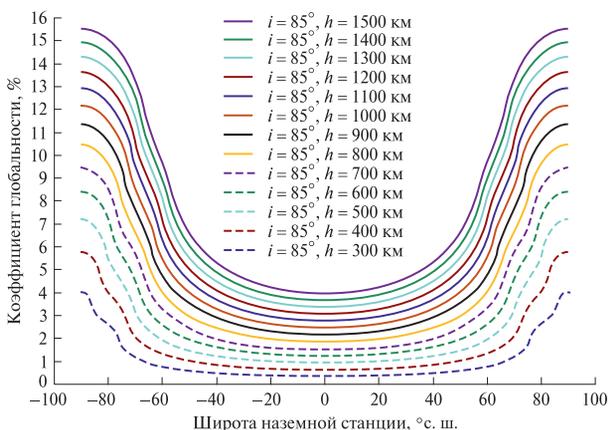


Рис. 10. Зависимость изменения коэффициента глобальности от широты наземной станции для орбит космических аппаратов с наклоном 85 град

Fig. 10. Dependence of the change in the coefficient of globality on the latitude of the ground station for spacecraft orbits with an inclination of 85 degrees

Графики изменения коэффициента глобальности в зависимости от широты НП и высоты траектории полета КА для наиболее интересных с точки зрения практики случаев приведены на рис. 9–11. При проведении расчетов было принято, что минимальный угол места составляет 7 град.

Представляет интерес запись результатов расчетов коэффициента глобальности в виде зависимости от наклона орбиты, широты точки стояния наземной станции и высоты траектории полета КА.

Из рис. 9–11 видно, что зависимость коэффициента глобальности от широты точки стояния наземной станции ведет себя по-разному на участках, где рассмотренные окружности S_N и S_K пересекаются и не пересекаются. Рационально провести аппроксимацию на этих участках отдельно. Кроме того, коэффициент глобальности

от широты станции зависит четным образом, т. е. достаточно провести аппроксимацию для $\varphi \in [0^\circ, 90^\circ]$.

Окружности не пересекаются, если

$$\varphi + l < 90^\circ - |90^\circ - i|. \quad (37)$$

Рассмотрим два участка аппроксимации

$$|\varphi| \leq 90^\circ - |90^\circ - i| - l; \quad (38)$$

$$|\varphi| \geq 90^\circ - |90^\circ - i| - l. \quad (39)$$

Величину l — радиус ЗРВ в угловой мере, зависящую от высоты орбиты КА, можно вычислить по формуле (17). Приведем таблицу значений l для отдельных орбит, где принято, что угол места составляет 7 град.

Рассмотрим возможность аппроксимации коэффициента глобальности при фиксированных наклонении i и угле места γ , с помощью многочлена от двух переменных: высоты h и широты точки стояния наземного пункта φ

$$K_{\text{гл}} \approx a_0 \varphi^4 \frac{h}{1000} + a_1 \varphi^4 + a_2 \varphi^2 \frac{h}{1000} + a_3 \varphi^2 + a_4 \frac{h}{1000} + a_5. \quad (40)$$

При этом по отдельности рассмотрим участки, задаваемые формулами (38) и (39) — назовем их экваториальной и полярной областями.

Для решения задачи рассмотрим линейную систему

$$Ax = b, \quad (41)$$

где в матрице A по строкам для каждой пары (φ, h) записаны значения

Т а б л и ц а 1
Радиус зоны радиовидимости в зависимости от высоты орбиты космического аппарата
 The radius of the radio visibility zone depending on the altitude of the spacecraft orbit

Высота орбиты, км	Радиус зоны радиовидимости, град	Высота орбиты, км	Радиус зоны радиовидимости, град	Высота орбиты, км	Радиус зоны радиовидимости, град
300	8,80	800	19,48	1300	26,20
400	11,56	900	21,02	1400	27,31
500	13,90	1000	22,45	1500	28,36
600	15,96	1100	23,78	1600	29,36
700	17,80	1200	25,02	1700	30,32

$$\left(\varphi^4 \frac{h}{1000}, \varphi^4, \varphi^2 \frac{h}{1000}, \varphi^2, \frac{h}{1000}, 1 \right),$$

матрица A имеет размер $N \times 6$, где N — число рассматриваемых пар; b — подсчитанное по выведенным выше формулам значение коэффициента глобальности для данных значений параметров; x — неизвестный вектор значений коэффициентов $a_i(i, \gamma)$.

Из линейной алгебры известно, что наименьшую квадратичную невязку можно достичь, если вектор x рассчитывать с помощью псевдообратной матрицы для A . Тогда

$$\hat{x} = (A^T A)^{-1} A^T b. \quad (42)$$

Результаты вычислений представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Коэффициенты аппроксимирующего полинома
 Coefficients of the approximating polynomial

Наклонение		a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
90°	экв.	2,26233	-0,284641	0,430981	-0,134157	2,82084	-0,420278
	пол.	-11,5993	3,81468	48,2945	-12,925	-35,8179	9,51314
85°	экв.	1,89301	-0,226581	0,803108	-0,186857	2,80119	-0,418353
	пол.	1,35548	-3,74888	0,330088	15,1181	8,13525	-16,8465
80°	экв.	1,8804	-0,218883	0,988703	-0,215218	2,82134	-0,421996
	пол.	8,02993	-7,37934	-23,3579	25,3704	26,4426	-22,7925
55°	экв.	4,07955	-0,278506	2,79656	-0,58558	3,37804	-0,507345
	пол.	1,24394	-4,44051	-3,05859	6,47703	7,2577	-2,79711
50°	экв.	4,92612	-0,164613	3,81776	-0,801041	3,61713	-0,54357
	пол.	1,57793	-4,72502	-3,53455	5,38384	7,05253	-1,93097
45°	экв.	5,77817	0,124568	5,33056	-1,09857	3,93528	-0,59378
	пол.	2,049	-5,21264	-4,07596	4,44569	6,91428	-1,3181

Т а б л и ц а 3
**Абсолютная погрешность вычислений
 коэффициента глобальности**

**Absolute calculations error
 of the globality coefficient**

Наклонение	Экваториальная область	Полярная область
90°	1,72571	1,70887
85°	0,982255	1,62937
80°	0,843268	1,30191
55°	0,706776	0,599085
50°	0,714074	0,650503
45°	0,733539	0,700297

Значения абсолютной погрешности вычисления коэффициента глобальности (%) для орбит пилотируемых КА и КА дистанционного зондирования Земли в диапазоне высот до 1000 км указаны в табл. 3.

Выводы

Решение рассмотренной задачи в аналитическом виде в двух постановках: с учетом вращения Земли и без учета вращения и сравнение полученных результатов свидетельствует о незначительном для практики различии результатов в обеих постановках.

Проведены качественная и количественная оценки точности полученных выражений. Точность полученных аналитических соотношений для наземных средств России тем выше, чем ближе траектории полета к полярным орбитам (погрешность выражений уменьшается от 10 % до нуля при возрастании наклонения от нуля до 90°).

Результаты, полученные численным моделированием полета КА, подтверждают корректность полученных аналитических соотношений и оценок их точности.

Глобальность видимости КА с НП может изменяться до 3–4 раз, в зависимости от точек стояния НП. Максимум достигается при близости наклонения орбиты и широты наземного пункта.

Полученные результаты представляют практический интерес для проектирования космических систем с группировками низкоорбитальных КА на круговых и околокруговых орбитах.

Список литературы

- [1] Луценко Ю.С., Матюшин М.М. Вопросы оптимизации пространственно-временной структуры космической группировки // Материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли», ВНИИ-ЭМ, 2016. М.: ВНИИЭМ, 2016. С. 16–22.
- [2] Основы теории полета космических аппаратов / под ред. Г.С. Нариманова. М.: Машиностроение, 1972. 608 с.
- [3] Поливников В.М. Распределение наземных средств управления космическими аппаратами методом последовательного исключения конфликтных ситуаций // Сборник статей VII науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов Центра управления полетами, посвященной памяти В.И. Лобачева, ЦНИИмаш, 4–7 апреля 2017 г., г. Королев Московской обл. Королев: Изд-во ЦНИИмаш, 2017. С. 292–296.
- [4] Тригонометрические соотношения в сферическом треугольнике, Энциклопедия элементарной математики. В 5 т. Т. 4. М.: Физматгиз, 1963, 568 с.
- [5] Официальная страница ФГБУ «Научно-исследовательский Центр «Планета». URL: <http://planet.iitp.ru> (дата обращения 05.07.2021).
- [6] Bate R.R., Mueller D.D., White J.E. Fundamentals of Astrodynamics. New York: Dover Publications, 1971, 455 p.
- [7] Battin R.H. An Introduction to the Mathematics and Methods of Astrodynamics, Revised Edition. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1999, 796 p.
- [8] Battin R.H. An Introduction to the Mathematics and Methods of Astrodynamics. New York: AIAA Education Series, 1987, 796 p.
- [9] Scharf D.P., Hadaegh F.Y., Kang B.H. A survey of spacecraft formation flying guidance. Int. Symp. on Formation Flying, Missions and Technologies, November 2002. Toulouse, France. URL: <https://trs.jpl.nasa.gov/bitstream/handle/2014/37195/02-2493.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (дата обращения 07.12. 2021 г.)
- [10] Schaub H. Relative orbit geometry through classical orbit element differences // J. of Guidance, Control and Dynamics, 2004, no. 27(5), pp. 839–848.
- [11] Bordner R.E., Wiesel W.E. Trajectory estimation for satellite clusters // J. of Guidance, Control, and Dynamics, 2006, v. 29, iss. 1, pp. 172–178.
- [12] Schaub H., Alfriend K.T. Hybrid Cartesian and Orbit Element Feedback Law for Formation Flying Spacecraft // J. of Guidance, Control and Dynamics, 2002, v. 25, pp. 387–393.
- [13] Alfriend K.T., Vaddi S.S., Lovell T.A. Formation maintenance for low Earth near-circular orbits // AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference, 2003, number AAS pp. 03–652.
- [14] Yang, Y. Quaternion based model for momentum biased nadir pointing spacecraft // Aerosp. Sci. Tech., 2010, no. 14(3), pp. 199–202.
- [15] Legostaev V.P., Mikrin E.A. History of spacecraft control systems // Automation and Remote Control, 2013, v. 74, iss. 3, pp. 331–347.
- [16] D'Amico S., Montenbruck O., Arbinger Ch., Fiedler H. Formation flying concept for close remote 14 sensing satellites // 15th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Conference, Copper Mountain, Colorado, 2005, number AAS pp. 05–156.
- [17] Won C. Comparative study of various control methods for attitude control of a LEO satellite // Aerosp. Sci. Tech., 1999, no. 3(5), pp. 323–333.
- [18] D'Amico S., Montenbruck O. Proximity operations of formation-flying spacecraft using an eccentricity/inclination vector separation // J. of Guidance, Control, and Dynamics, 2006, no. 29(3), pp. 554–563.
- [19] Sidi M. Spacecraft Dynamics and Control: A Practical Engineering Approach. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997, 409 p.
- [20] Ardaens J.S., D'Amico S. Control of Formation Flying Spacecraft at a Lagrange Point. DLR/GSOC, 2008, 43 p.
- [21] Ardaens J.S., D'Amico S., Kazeminejad B., Montenbruck O., Gill E. Spaceborne autonomous and

- ground based relative orbit control for the TerraSAR-X/TanDEM-X formation // 20th International Symposium on Space Flight Dynamics. Number 03-652, September 24–28, 2007. Annapolis, USA: Goddard Space Flight Center, 2007, pp. 1–13.
- [22] Wen J., Kreutz-Delgado K. The attitude control problem // IEEE Tran. Automat. Control, 1991, no. 36(10), pp. 1148–1161.
- [23] Clohessy W.H., Wiltshire R.S. Terminal guidance system for satellite rendezvous // J. of the Aerospace Sciences, 1960, no. 27, pp. 653–658.
- [24] Won C. Comparative study of various control methods for attitude control of a LEO satellite // Aerosp. Sci. Tech., 1999, no. 3(5), pp. 323–333.
- [25] Markley F.L., Crassidis J.L. Fundamentals of Spacecraft Attitude Determination and Control. Springer, 2014, 486 p.

Сведения об авторах

Луценко Юрий Станиславович — канд. техн. наук, и. о. гл. науч. сотр. АО «ЦНИИмаш», colon.lys@gmail.com

Поливников Владимир Михайлович — инженер 1 категории АО «ЦНИИмаш», polivnikov.v@gmail.com

Малашин Алексей Анатольевич✉ — зав. кафедрой «Прикладная математика, информатика и вычислительная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), malashin@mgul.ac.ru

Поступила в редакцию 08.11.2021.

Одобрено после рецензирования 16.02.2022.

Принята к публикации 04.04.2022.

GLOBAL RADIO VISIBILITY OF LOW-ORBIT SPACECRAFT

Y.S. Lucenko¹, V.M. Polivnikov¹, A.A. Malashin^{2✉}

¹JSC «TsNIIMash», 4, Pionerskaya st., 141070, Korolev, Moscow reg., Russia

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

malashin@mgul.ac.ru

Design optimization of the orbital and target groups of spacecrafts, ground-based control facilities and reception of target information is impossible without taking into account the global visibility of the spacecraft by ground-based means. The estimation of this parameter is traditionally performed using numerical methods for calculating spacecraft flight paths over long time intervals and does not allow us to visualize the relationship between the trajectory parameters and the effectiveness of the systems. The article considers several variants of analytical methods for calculating the global visibility, which allows us to evaluate the capabilities of operational control of the spacecraft and to obtain target information, the load of ground-based means, the volume of transmitted (received) information and the effectiveness of systems. The conclusion of the ratios for calculating the globality coefficient, graphs of its changes for low-orbit spacecraft, and an estimate of the accuracy of the obtained ratios are given. The graphs of global visibility make it easy to determine the optimal characteristics of the space-time structures of the created systems at the initial stage of design. Estimates of the accuracy of the results were obtained using «accurate» spacecraft flight models and confirm the recommendations for the practical application of the research results. The results obtained are of practical interest in the design of any space spacecraft systems in circular orbits.

Keywords: visibility zone, ground facilities, globality coefficient, design

Suggested citation: Lucenko Y.S., Polivnikov V.M., Malashin A.A. *Global 'nost' radiovidimosti nizkoorbital'nykh kosmicheskikh apparatov* [Global radio visibility of low-orbit spacecraft]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 3, pp. 115–124. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-115-124

References

- [1] Lutsenko Yu.S., Matyushin M.M. *Voprosy optimizatsii prostranstvenno-vremennoy struktury kosmicheskoy gruppirovki* [Issues of optimizing the spatio-temporal structure of the space constellation]. *Materialy chetvertoy mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Aktual'nye problemy sozdaniya kosmicheskikh sistem distantsionnogo zondirovaniya Zemli»* [Proceedings of the fourth international scientific and technical conference «Actual problems of creating space systems for remote sensing of the Earth»], VNIIEМ, 2016, pp. 16–22.
- [2] *Osnovy teorii poleta kosmicheskikh apparatov* [Fundamentals of the theory of spacecraft flight]. Ed. G.S. Narimanov Moscow: Mashinostroenie [Mechanical Engineering], 1972, 608 p.
- [3] Polivnikov V.M. *Raspredelenie nazemnykh sredstv upravleniya kosmicheskimi apparatami metodom posledovatel'nogo iskl'yucheniya konfliktnykh situatsiy* [Distribution of ground-based spacecraft controls by the method of sequential exclusion of conflict situations]. *Sbornik statey VII nauchno-tehnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov Tsentra*

- upravleniya poletami, posvyashchennoy pamyati V.I. Lobacheva [Collection of articles of the VII scientific and technical conference of young scientists and specialists of the Mission Control Center, dedicated to the memory of V.I. Lobacheva], TsNIIMash, April 4–7, 2017, Korolev, Moscow Region. Korolev: TsNIIMash, 2017, pp. 292–296.
- [4] *Trigonometricheskie sootnosheniya v sfericheskom treugol'nike, Entsiklopediya elementarnoy matematiki* [Trigonometric relations in a spherical triangle, Encyclopedia of Elementary Mathematics], in 5 vol., vol. 4. Moscow: Fizmatgiz, 1963, 568 p.
- [5] *Ofitsial'naya stranitsa FGBU «Nauchno issledovatel'skiy Tsentr «Planeta»* [Research Center «Planeta» official page]. Available at: <http://planet.iitp.ru> (accessed 05.07.2021).
- [6] Bate R.R., Mueller D.D., White J.E. *Fundamentals of Astrodynamics*. New York: Dover Publications, 1971, 455 p.
- [7] Battin R.H. *An Introduction to the Mathematics and Methods of Astrodynamics*, Revised Edition. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1999, 796 p.
- [8] Battin R.H. *An Introduction to the Mathematics and Methods of Astrodynamics*. New York: AIAA Education Series, 1987, 796 p.
- [9] Scharf D.P., Hadaegh F.Y., Kang B.H. A survey of spacecraft formation flying guidance. International Symposium on Formation Flying, Missions and Technologies, November 2002. Toulouse, France. URL: <https://trs.jpl.nasa.gov/bitstream/handle/2014/37195/02-2493.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (дата обращения 07.12.2021 г.)
- [10] Schaub H. Relative orbit geometry through classical orbit element differences. *J. of Guidance, Control and Dynamics*, 2004, no. 27(5), pp. 839–848.
- [11] Bordner R.E., Wiesel W.E. Trajectory estimation for satellite clusters. *J. of Guidance, Control, and Dynamics*, 2006, v. 29, iss. 1, pp. 172–178.
- [12] Schaub H., Alfriend K.T. Hybrid Cartesian and Orbit Element Feedback Law for Formation Flying Spacecraft. *J. of Guidance, Control and Dynamics*, 2002, v. 25, pp. 387–393.
- [13] Alfriend K.T., Vaddi S.S., Lovell T.A. Formation maintenance for low Earth near-circular orbits. AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference, 2003, number AAS pp. 03–652.
- [14] Yang, Y. Quaternion based model for momentum biased nadir pointing spacecraft. *Aerosp. Sci. Tech.*, 2010, no. 14(3), pp. 199–202.
- [15] Legostaev V.P., Mikrin E.A. History of spacecraft control systems. *Automation and Remote Control*, 2013, v. 74, iss. 3, pp. 331–347.
- [16] D'Amico S., Montenbruck O., Arbinger Ch., Fiedler H. Formation flying concept for close remote 14 sensing satellites. 15th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Conference, Copper Mountain, Colorado, 2005, number AAS pp. 05–156.
- [17] Won C. Comparative study of various control methods for attitude control of a LEO satellite. *Aerosp. Sci. Tech.*, 1999, no. 3(5), pp. 323–333.
- [18] D'Amico S., Montenbruck O. Proximity operations of formation-flying spacecraft using an eccentricity/inclination vector separation. *J. of Guidance, Control, and Dynamics*, 2006, no. 29(3), pp. 554–563.
- [19] Sidi M. *Spacecraft Dynamics and Control: A Practical Engineering Approach*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997, 409 p.
- [20] Ardaens J.S., D'Amico S. Control of Formation Flying Spacecraft at a Lagrange Point. DLR/GSOC, 2008, 43 p.
- [21] Ardaens J.S., D'Amico S., Kazeminejad B., Montenbruck O., Gill E. Spaceborne autonomous and ground based relative orbit control for the TerraSAR-X/TanDEM-X formation. 20th International Symposium on Space Flight Dynamics. Number 03-652, September 24–28, 2007. Annapolis, USA: Goddard Space Flight Center, 2007, pp. 1–13.
- [22] Wen J., Kreutz-Delgado K. The attitude control problem. *IEEE Tran. Automat. Control*, 1991, no. 36(10), pp. 1148–1161.
- [23] Clohessy W.H., Wiltshire R.S. Terminal guidance system for satellite rendezvous. *J. of the Aerospace Sciences*, 1960, no. 27, pp. 653–658.
- [24] Won C. Comparative study of various control methods for attitude control of a LEO satellite. *Aerosp. Sci. Tech.*, 1999, no. 3(5), pp. 323–333.
- [25] Markley F.L., Crassidis J.L. *Fundamentals of Spacecraft Attitude Determination and Control*. Springer, 2014, 486 p.

Authors' information

Lucenko Yuriy Stanislavovich — Cand. Sci. (Tech.), Acting Chief Scientific Officer JSC Tsniimash, Colon.lys@gmail.com

Polivnikov Vladimir Mikhaylovich — Engineer of the 1st category of the TsNIIMash, polivnikov.v@gmail.com

Malashin Aleksey Anatol'evich ✉ — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), malashin@mgul.ac.ru

Received 08.11.2021.

Approved after review 16.02.2022.

Accepted for publication 04.04.2022.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

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

The authors declare that there is no conflict of interest

МАТРИЧНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПРОЕКТОРОВ И ИХ ПРИЛОЖЕНИЯ

А.М. Ветошкин^{1✉}, А.А. Шум²

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

²ТГТУ, 170026, г. Тверь, наб. Афанасия Никитина, д. 22

vetkin@mgul.ac.ru

Предлагается формула вычисления псевдообратной матрицы для блочной матрицы $[A:B]$ в случае, когда

подпространства строк матриц A и B пересекаются только по нулю ($\{A\} \cap \{B\} = 0$): $[A:B]^+ = \begin{bmatrix} (\tilde{B}A)^+ \\ (\tilde{A}B)^+ \end{bmatrix}$.

Рассмотрены полезные примеры применения приведенной формулы. Получена формула Андерсона — Даффина для двух ортопроекторов \hat{A} и \hat{B} . Установлено: $(\hat{A} + \hat{B} - \hat{A}\hat{B} - \hat{B}\hat{A})^+ = pp^*p + qq^*q$, где $p = (\hat{B}\hat{A})^+$; $q = (\hat{A}\hat{B})^+$; псевдообратная матрица коммутатора $PP^* - P^*P$ равна сумме четырех проекторов. Найдена псевдообратная матрица от суммы двух проекторов.

Ключевые слова: проектор, ортопроектор, косой проектор, псевдообратная матрица, формула Клайна

Ссылка для цитирования: Ветошкин А.М., Шум А.А. Матричные представления проекторов и их приложения // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 3. С. 125–130. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-125-130

Пусть $M_{n,k} = M_{n,k}(\mathbb{F})$ — множество прямоугольных матриц размера $n \times k$ с элементами из поля $\mathbb{F} = \mathbb{C}, \mathbb{R}$. Если $n = k$, то вместо $M_{n,n}$ пишем M_n . Матрица $P \in M_n$ называется проектором, если $P^2 = P$. Если проектор P является эрмитовой матрицей, то P называется ортопроектором.

Подпространства L и M называются дополнителными, если они пересекаются по нулевому вектору, и $L + M = \mathbb{F}^n$. Обозначим матрицу, проектирующую на подпространство L вдоль подпространства M , через $\text{Pr}(L, M)$. Для подпространства, натянутого на столбцы матрицы A (образа A), будем использовать такое обозначение: $\{A\}$. Если подпространства, определяющие проектор, задаются матрицами $L = \{A\}$ и $M = \{B\}$, то вместо $\text{Pr}(L, M)$, или $\text{Pr}(\{A\}, \{B\})$ пишем $\text{Pr}(A, B)$.

Используем обозначение: L^\perp — ортогональное дополнение к подпространству L . Через M^+ в соответствии с работами [1–4] обозначаем псевдообратную матрицу к матрице M .

Для ортопроектора $\text{Pr}(A) = \text{Pr}(\{A\}, \{A\}^\perp)$, задаваемого матрицей A , используется также обозначение \hat{A} . Отметим, что $\hat{A} = AA^+$. *Дополнительный проектор* вводится соотношением $\tilde{A} = I_n - \hat{A}$, где I_n — единичная матрица порядка n .

В работе [5] получены следующие полезные результаты, имеющие отношение к двум матрицам A и B с одинаковым числом строк.

Теорема. Пусть подпространства $\{A\}$ и $\{B\}$ являются дополнителными. Тогда проектор на подпространство $\{A\}$ вдоль подпространства $\{B\}$ дается выражением

$$\text{Pr}(A, B) = A(\tilde{B}A)^+. \quad (1)$$

Причем, если A столбцовая матрица полного ранга, то

$$\text{Pr}(A, B) = A(A^*\tilde{B}A)^{-1}A^*\tilde{B}. \quad (2)$$

Если для матриц A и B потребовать только то, чтобы пересечение натянутых на них подпространств было нулевым ($\{A\} \cap \{B\} = 0$), то выполняются равенства:

$$A(\tilde{B}A)^+ = (\tilde{B}\hat{A})^+ = \text{Pr}(\{A\}, \{B\} + (\{A\} + \{B\})^\perp). \quad (3)$$

$$A(\tilde{B}A)^+ + B(\tilde{A}B)^+ = \text{Pr}([A:B]). \quad (4)$$

В случае произвольных матриц A и B с одинаковым числом строк матричное выражение $(\tilde{B}A)^+$ является следующим проектором

$$(\tilde{B}\hat{A})^+ = \text{Pr}(\{A\} \cap (\{A\} \cap \{B\})^\perp, \{B\} + (\{A\} + \{B\})^\perp). \quad (5)$$

Если $\{A\} \cap \{B\} = 0$, то

$$[A:B]^+ = \begin{bmatrix} (\tilde{B}A)^+ \\ (\tilde{A}B)^+ \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Запись $[A:B]$ используется для обозначения блочной матрицы, полученной последовательным выписыванием столбцов матрицы A и столбцов матрицы B .

Следующая лемма [5] полезна при манипуляциях с выражениями вида $\tilde{B}A$ или $\tilde{B}A$.

Лемма. Пусть матрица A — столбцовая полного ранга, у матрицы B такое же число строк, как у матрицы A . Матрица $\tilde{B}A$ — столбцовая полного ранга тогда и только тогда, когда

$\{A\} \cap \{B\}^\perp = 0$. Матрица $\tilde{B}A$ — столбцовая полного ранга тогда и только тогда, когда $\{A\} \cap \{B\} = 0$.

Цель работы

Цель работы — проиллюстрировать полезность результатов (1) – (6) из работы [5] для вычисления псевдообратной матрицы для матриц, представленных различными многочленными выражениями от проекторов.

Постановка задачи

Нередко возникает необходимость вычислить или преобразовать псевдообратную матрицу для некоторого матричного выражения. И зачастую это представляет непростую задачу.

В качестве примера можно привести теорему Андерсона — Даффина [6]. В этой теореме рассматривается выражение $2P(P + Q)^+Q$ для двух ортопроекторов P и Q . Оказывается, это выражение задает ортопроектор на пересечение образов этих проекторов. В свое время этот результат произвел большое впечатление и был даже назван жемчужиной линейной алгебры.

Применение рекламируемых в данной работе методов к упомянутому выражению позволяет получить результат Андерсона — Даффина путем почти механических вычислений, может быть, и не очень коротких (см. ниже пример 1).

Средства и методы

Перечислим здесь важные свойства псевдообратной матрицы, а также некоторые другие факты [4, 7–15], на которые будет опираться дальнейшее изложение.

Если A имеет полный ранг по столбцам, то $A^+ = (A^*A)^{-1}A^*$, $A^+A = I$. (7)

Если A имеет полный ранг по строкам, то $A^+ = A^*(AA^*)^{-1}$, $AA^+ = I$. (8)

Пусть матрица A имеет скелетное разложение $A = XY$, где X — столбцовая матрица полного ранга, а Y — строчная матрица полного ранга, тогда $A^+ = (XY)^+ = Y^+X^+$. (9)

$$A^+B = 0 \Leftrightarrow A^*B = 0. \quad (10)$$

Выполняются равенства

$$\tilde{A}\hat{A} = \hat{A}\tilde{A} = 0, \quad \tilde{A}A = 0, \quad A^*\tilde{A} = 0. \quad (11)$$

Имеет место следствие из работы [1]:

Клайн — Следствие 1.4.

$$[A : B]^+ = \begin{bmatrix} A^+ \\ B^+ \end{bmatrix} \quad (12)$$

тогда и только тогда, когда $\tilde{A}B = B$.

Условие $\tilde{A}B = B$ эквивалентно такому: $\hat{A}B = 0$, или $\{B\} \subset \ker A = \{A\}^\perp$, или $A^*B = 0$.

Примеры вычисления псевдообратных матриц

Приведем несколько примеров вычисления псевдообратной матрицы для матриц, представленных различными многочленными выражениями от проекторов.

Пример 1

Вычислим псевдообратную матрицу для суммы двух ортопроекторов \hat{A} и \hat{B} . Для этого воспользуемся разложением подпространств $\{A\}$ и $\{B\}$ в прямые суммы подпространств так, как это сделано в работе [5]. Рассмотрим следующие подпространства: $\mathcal{A} = \{A\}$, $\mathcal{B} = \{B\}$, $\mathcal{Y} = \mathcal{A} \cap \mathcal{B}$, $\mathcal{X} = \mathcal{A} \cap \mathcal{Y}^\perp$ и $\mathcal{Z} = \mathcal{B} \cap \mathcal{Y}^\perp$ так, что $\mathcal{A} = \mathcal{X} \oplus \mathcal{Y}$ и $\mathcal{B} = \mathcal{Z} \oplus \mathcal{Y}$. Пусть матрицы X, Y, Z составлены из базисных векторов подпространств $\mathcal{X}, \mathcal{Y}, \mathcal{Z}$ соответственно и столбцы матриц X, Y, Z образуют ортонормированные системы векторов. В результате получаем, что $\hat{A} = \hat{X} + \hat{Y}$ и $\hat{B} = \hat{Z} + \hat{Y}$.

Поскольку столбцы матриц X, Y, Z линейно независимы, можно воспользоваться свойством (9)

$$\begin{aligned} (\hat{A} + \hat{B})^+ &= (\hat{X} + \hat{Z} + 2\hat{Y})^+ = (XX^* + ZZ^* + 2YY^*)^+ = \\ &= \left([X : Z : 2Y] \begin{bmatrix} X^* \\ Z^* \\ Y^* \end{bmatrix} \right)^+ = \begin{bmatrix} X^* \\ Z^* \\ Y^* \end{bmatrix}^+ [X : Z : 2Y]^+ = \\ &= [X : Z : Y]^{+*} [X : Z : 2Y]^+ . \end{aligned}$$

Из выражений (12) и (6) получаем

$$[X : Z : Y]^+ = \begin{bmatrix} [X : Z]^+ \\ Y^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\tilde{Z}X)^+ \\ (\tilde{X}Z)^+ \\ Y^+ \end{bmatrix} .$$

Поэтому

$$\begin{aligned} (\hat{A} + \hat{B})^+ &= \left[(\tilde{Z}X)^{+*} : (\tilde{X}Z)^{+*} : Y \right] \begin{bmatrix} (\tilde{Z}X)^+ \\ (\tilde{X}Z)^+ \\ \frac{1}{2}Y^* \end{bmatrix} = \\ &= (X^*\tilde{Z})^+ (\tilde{Z}X)^+ + (Z^*\tilde{X})^+ (\tilde{X}Z)^+ + \frac{1}{2}\hat{Y} = \\ &= (X^*\tilde{Z})^+ X^*X (\tilde{Z}X)^+ + (Z^*\tilde{X})^+ Z^*Z (\tilde{X}Z)^+ + \frac{1}{2}\hat{Y} = \\ &= p^*p + q^*q + \frac{1}{2}\hat{Y}, \end{aligned}$$

где p и q два проектора:

$$\begin{aligned} p &= X(\tilde{Z}X)^+ = X(X^*\tilde{Z}X)^{-1}X^*\tilde{Z} = (\tilde{B}\hat{A})^+; \\ q &= Z(\tilde{X}Z)^+ = Z(Z^*\tilde{X}Z)^{-1}Z^*\tilde{X} = (\tilde{A}\hat{B})^+, \end{aligned} \quad (13)$$

Причем, исходя из выражения (4) имеем

$$p + q = P(\{X\} + \{Z\}). \quad (14)$$

Таким образом,

$$(\hat{A} + \hat{B})^+ = p^* p + q^* q + \frac{1}{2} \hat{Y}. \quad (15)$$

Кроме того,

$$(\hat{X} + \hat{Z})^+ = p^* p + q^* q. \quad (16)$$

Составим следующую таблицу произведений проекторов:

	\hat{X}	\hat{Y}	\hat{Z}	p	q	p^*	q^*
\hat{X}	\hat{X}	0	$\hat{X}\hat{Z}$	p	$\hat{X}q$	\hat{X}	0
\hat{Y}	0	\hat{Y}	0	0	0	0	0
\hat{Z}	$\hat{Z}\hat{X}$	0	\hat{Z}	$\hat{Z}p$	q	0	\hat{Z}
p	\hat{X}	0	0	p	0	pp^*	pq^*
q	0	0	\hat{Z}	0	q	qp^*	qq^*
p^*	p^*	0	$p^*\hat{Z}$	p^*p	pq^*	p^*	0
q^*	$q^*\hat{Z}$	0	q^*	q^*p	q^*q	0	q^*

Используя (15) и эту таблицу, получим формулу Андерсона — Даффина [16–17]:

$$2\hat{A}(\hat{A} + \hat{B})^+ \hat{B} = \hat{Y}. \quad (17)$$

Аналогичным образом вычисляется выражение

$$(\hat{A} - \hat{B})^+ = p^* p - q^* q. \quad (18)$$

Получаем равенства:

$$\begin{aligned} \hat{X} &= \hat{A}(\hat{A} - \hat{B})^+ \hat{A}, \\ \hat{Z} &= \hat{B}(\hat{B} - \hat{A})^+ \hat{B}, \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} p &= \hat{A}(\hat{A} - \hat{B})^+, \\ q &= \hat{B}(\hat{B} - \hat{A})^+, \end{aligned} \quad (20)$$

и

$$\begin{aligned} \hat{X} &= p(p^* p + q^* q)^+ p^*, \\ \hat{Z} &= q(q^* p + p^* q)^+ q^*. \end{aligned} \quad (21)$$

Отметим, что формулы (19) – (21) являются аналогами и обобщениями формул (5.3) – (5.6) из работы [18], в которой рассматривается случай, когда образы ортопроекторов \hat{A} и \hat{B} дополнены.

Пример 2

Вычислим C^+ , где $C = \hat{A} + \hat{B} - \hat{A}\hat{B} - \hat{B}\hat{A}$. Применяя те же представления ортопроекторов A и B , что и в примере 1, получаем:

$$\begin{aligned} C &= \hat{X} + \hat{Z} - \hat{X}\hat{Z} - \hat{Z}\hat{X} = \\ &= XX^* + ZZ^* - XX^*ZZ^* - ZZ^*XX^* = \\ &= [X : Z] \begin{bmatrix} I & -X^*Z \\ -Z^*X & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X^* \\ Z^* \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Выполняется следующее тождество для блочной матрицы

$$\begin{bmatrix} I & a \\ b & I \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} I & -a \\ -b & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (I - ab)^{-1} & 0 \\ 0 & (I - ba)^{-1} \end{bmatrix}.$$

В нашем случае $(I - ab)^{-1} = (X^*X - X^*\hat{Z}X)^{-1} = (X^*\tilde{Z}X)^{-1} = \alpha$ и $(I - ba)^{-1} = (Z^*\hat{X}Z)^{-1} = \beta$ — по лемме нужные обратные матрицы существуют.

$$\begin{aligned} C^+ &= [X : Z]^+ \begin{bmatrix} X^*X & X^*Z \\ Z^*X & Z^*Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & \beta \end{bmatrix} [X : Z]^+ = \\ &= [(X^*\tilde{Z})^+ : (Z^*\hat{X})^+] \begin{bmatrix} X^* \\ Z^* \end{bmatrix} [X : Z] \begin{bmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X^*X & 0 \\ 0 & Z^*Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\tilde{Z}X)^+ \\ (\hat{X}Z)^+ \end{bmatrix} = \\ &= (p^* + q^*) [X\alpha : Z\beta] \begin{bmatrix} X^* \cdot X(\tilde{Z}X)^+ \\ Z^* \cdot Z(\hat{X}Z)^+ \end{bmatrix} = (p^* + q^*) (X\alpha X^* p + Z\beta Z^* q). \end{aligned}$$

Поскольку $p^* + q^* = p + q$ и $pp^* = X\alpha X^*$, $qq^* = Z\beta Z^*$, то, учитывая данные таблицы, получаем

$$(\hat{A} + \hat{B} - \hat{A}\hat{B} - \hat{B}\hat{A})^+ = pp^* p + qq^* q. \quad (22)$$

Пример 3

Рассмотрим коммутатор произвольного проектора P и сопряженного ему: $K = PP^* - P^*P$. Произвольный проектор P [19] можно единственным образом представить в виде суммы ортопроектора r и строго косоуго проектора s : $P = r + s$. (Строго косоуго проектор — это проектор, у которого образ и ортогональное дополнение к ядру пересекаются только по нулю [19]). После несложных вычислений получаем $K = ss^* - s^*s$. Как видно из этого равенства, данный коммутатор определяется только строго косоуго частью проектора P .

Вычисляем выражение K^+ . Для этого рассмотрим представление проектора s вида (2): $s = x(x^*\tilde{y}x)^{-1}x^*\tilde{y}$, где матрицы x и y задают соответственно образ и ядро проектора s . Удобно выбрать столбцы матриц x и y ортонормированными, так что $x^*x = I$, $y^*y = I$. Определим следующие матрицы: $\alpha = x^*\tilde{y}x$, $\beta = x^*\tilde{y}x$. Для них выполняются следующие соотношения — $\alpha + \beta = I$, $\alpha\beta = \beta\alpha$. Матрицы α и β являются невырожденными, как матрицы Грама линейно независимых систем векторов, задаваемых столбцами матриц $\tilde{y}x$ и $\tilde{y}x$.

$$\begin{aligned}
 K &= x\alpha^{-1}x^*\tilde{y} \cdot \tilde{y}x\alpha^{-1}x^* - \tilde{y}x\alpha^{-1}x^* \cdot x\alpha^{-1}x^*\tilde{y} = \\
 &= x\alpha^{-1}x^* - \tilde{y}x\alpha^{-2}x^*\tilde{y} = \\
 &= [x : \tilde{y}x] \begin{bmatrix} \alpha^{-1} & 0 \\ 0 & -\alpha^{-2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^* \\ x^*\tilde{y} \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

Так как $(\ker s)^\perp = \{y\}^\perp = \{\tilde{y}x\}$, то в силу того, что матрица s строго косая, выполняется условие: $\{\tilde{y}x\} \cap \{x\} = 0$. Это означает, что столбцы матрицы $[x : \tilde{y}x]$ линейно независимы, а потому можно к факторизации K применить свойство (9):

$$K^+ = [x : \tilde{y}x]^+ \begin{bmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & -\alpha^2 \end{bmatrix} [x : \tilde{y}x]^+.$$

По формуле (6) получаем:

$$[x : \tilde{y}x]^+ = \begin{bmatrix} (\tilde{z}x)^+ \\ (\tilde{x}\tilde{y}x)^+ \end{bmatrix}, \quad z = \tilde{y}x.$$

Поскольку $\{\tilde{y}x\} = \{y\}^\perp$, то дополнительным проектором к ортопроектору на подпространство $\{y\}^\perp$ будет \hat{y} . В силу леммы $\tilde{x} \cdot \tilde{y}x$ есть столбцовая матрица полного ранга тогда и только тогда, когда $\{x\} \cap \{\tilde{y}x\} = 0$, а последнее следует из того, что s строго косая матрица. Таким образом, учитывая выражение (7), получаем:

$$[x : \tilde{y}x]^+ = \begin{bmatrix} (\hat{y}x)^+ \\ (\tilde{x}\tilde{y}x)^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (x^*\hat{y}x)^{-1}x^*\hat{y} \\ (x^*\tilde{y}\tilde{x}\tilde{y}x)^{-1}x^*\tilde{y}\tilde{x} \end{bmatrix}.$$

Так как $x^*\tilde{y}\tilde{x}\tilde{y}x = -x^*\tilde{y}\tilde{x}\hat{y}x = x^*\tilde{y}\hat{x}\hat{y}x = \alpha\beta$, то

$$[x : \tilde{y}x]^+ = \begin{bmatrix} \beta^{-1}x^*\hat{y} \\ \alpha^{-1}\beta^{-1}x^*\tilde{y}\tilde{x} \end{bmatrix}.$$

Далее получаем:

$$\begin{aligned}
 K^+ &= [\hat{y}x\beta^{-1} : \tilde{x}\tilde{y}x\beta^{-1}\alpha^{-1}] \begin{bmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & -\alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta^{-1}x^*\hat{y} \\ \alpha^{-1}\beta^{-1}x^*\tilde{y}\tilde{x} \end{bmatrix} = \\
 &= \hat{y}x\beta^{-1}\alpha\beta^{-1}x^*\hat{y} - \tilde{x}\tilde{y}x\beta^{-2}x^*\tilde{y}\tilde{x}.
 \end{aligned}$$

В последнем выражении преобразуем два под-выражения:

$$\beta^{-1}\alpha\beta^{-1} = \beta^{-1}(1 - \beta)\beta^{-1} = \beta^{-2} - \beta^{-1},$$

$$\tilde{x}\tilde{y}x\beta^{-1} = -\tilde{x}\hat{y}x\beta^{-1} = (\hat{x} - I)\hat{y}x\beta^{-1} = x - \hat{y}x\beta^{-1}.$$

Далее:

$$\begin{aligned}
 K^+ &= \hat{y}x(\beta^{-2} - \beta^{-1})x^*\hat{y} - (x - \hat{y}x\beta^{-1})(x^* - \beta^{-1}x^*\hat{y}) = \\
 &= x\beta^{-1}x^*\hat{y} + \hat{y}x\beta^{-1}x^* - \hat{x} - \hat{y}x\beta^{-1}x^*\hat{y}.
 \end{aligned}$$

$$K^+ = t + t^* - \hat{x} - \hat{w}, \quad w = \hat{y}x. \quad (23)$$

Здесь $t = x(x^*\hat{y}x)^{-1}x^*\hat{y}$ — косо́й проектор, связанный с косо́м проектором s . Отметим, что ортопроектор $\hat{w} = \hat{y}x(x^*\hat{y}x)^{-1}x^*\hat{y}$, вообще говоря, не равен ортопроектору \hat{y} .

Пример 4

Вычисляем псевдообратную для суммы двух проекторов. Попытаемся найти такие проекторы, для которых удастся провести вычисления в духе первых трех примеров.

Пусть A, B, C, D такие столбцовые матрицы полного ранга, что $\{A\}, \{B\}$ и $\{C\}, \{D\}$ — пары дополнительных подпространств.

Имеем

$$\begin{aligned}
 &\Pr(A, B) + a\Pr(C, D) = \\
 &= [A : C] \begin{bmatrix} (A^*\tilde{B}A)^{-1} & 0 \\ 0 & a(C^*\tilde{D}C)^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A^*\tilde{B} \\ C^*\tilde{D} \end{bmatrix},
 \end{aligned}$$

где $a \neq 0$.

Можно вычислить псевдообратную матрицу суммы $P(A, B) + aP(C, D)$ если будут выполняться условия:

$$\{A\} \cap \{C\} = 0, \quad \{\tilde{B}A\} \cap \{\tilde{D}C\} = 0.$$

Поскольку $\{B\}^\perp = \{\tilde{B}A\}$ и $\{D\}^\perp = \{\tilde{D}C\}$, условие $\{\tilde{B}A\} \cap \{\tilde{D}C\} = 0$ выполняется тогда и только тогда, когда

$$\begin{aligned}
 (\{\tilde{B}A\} \cap \{\tilde{D}C\})^\perp &= (\{B\}^\perp \cap \{D\}^\perp)^\perp = \\
 &= \{B\} + \{D\} = C^n.
 \end{aligned}$$

Сумма подпространств $\{B\}$ и $\{D\}$ здесь не обязательно должна быть прямой. Далее

$$\begin{aligned}
 &(\Pr(A, B) + a\Pr(C, D))^+ = \\
 &= [\tilde{B}A : \tilde{D}C]^+ \begin{bmatrix} (A^*\tilde{B}A) & 0 \\ 0 & a^{-1}(C^*\tilde{D}C) \end{bmatrix} [A : C]^+.
 \end{aligned}$$

Так как

$$[A : C]^+ = \begin{bmatrix} (\tilde{C}A)^+ \\ (\tilde{A}C)^+ \end{bmatrix},$$

$$[\tilde{B}A : \tilde{D}C]^+ = \begin{bmatrix} (\tilde{U}\tilde{B}A)^+ \\ (\tilde{V}\tilde{D}C)^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\hat{D}\tilde{B}A)^+ \\ (\hat{B}\tilde{D}C)^+ \end{bmatrix},$$

$$U = \tilde{D}C, \quad V = \tilde{B}A,$$

то

$$\begin{aligned}
 &(\Pr(A, B) + a\Pr(C, D))^+ = \\
 &= (A^*\tilde{B}\hat{D})^+ A^*\tilde{B}A(\tilde{C}A)^+ + a^{-1}(C^*\tilde{D}\hat{B})^+ C^*\tilde{D}C(\tilde{A}C)^+ = \\
 &= (A^*\tilde{B}\hat{D})^+ A^*\tilde{B}(\tilde{C}\hat{A})^+ + a^{-1}(C^*\tilde{D}\hat{B})^+ C^*\tilde{D}(\tilde{A}\hat{C})^+.
 \end{aligned}$$

Рассмотрим выражение $\tilde{B}A(\hat{D}\tilde{B}A)^+$. Поскольку $\{B\}^\perp \cap \{D\}^\perp = 0$, то выражение $\hat{D}\tilde{B}A$ по лемме будет столбцовой матрицей полного ранга, как и матрица $\tilde{B}A$.

$$\tilde{B}A(\hat{D}\tilde{B}A)^+ = (\hat{D}\tilde{B}A(\tilde{B}A)^+)^+ = (\hat{D}\tilde{B})^+.$$

Таким образом, можно сформулировать следующее утверждение.

Утверждение. Пусть A, B, C, D такие столбцовые матрицы полного ранга, что $\{A\}, \{B\}$ и $\{C\}, \{D\}$ — пары дополнительных подпространств, кроме того, подпространства $\{A\}$ и $\{C\}$ пересекаются лишь по нулевому вектору, а подпространства $\{B\}$ и $\{D\}$ дают в сумме все пространство, тогда

$$\begin{aligned} & (\Pr(A, B) + a \Pr(C, D))^+ = \\ & = (\tilde{B}\hat{D})^+ (\tilde{C}\hat{A})^+ + a^{-1} (\tilde{D}\hat{B})^+ (\tilde{A}\hat{C})^+. \end{aligned} \quad (24)$$

Если, кроме того, подпространства $\{B\}$ и $\{D\}$ дополнены, то

$$\begin{aligned} & (\Pr(A, B) + a \Pr(C, D))^+ = \\ & = (\Pr(A, B) + a \Pr(C, D))^{-1} = \\ & = \Pr(D, B) \Pr(A, C) + a^{-1} \Pr(B, D) \Pr(C, A). \end{aligned} \quad (25)$$

Укажем частный случай формулы (25), когда подпространства $\{B\}$ и $\{C\}$ совпадают:

$$\begin{aligned} & (\Pr(A, B) + a \Pr(B, D))^{-1} = \\ & = \Pr(D, B) \Pr(A, B) + a^{-1} \Pr(B, D) \Pr(B, A) = \\ & = \Pr(D, B) + a^{-1} \Pr(B, A). \end{aligned} \quad (26)$$

Здесь использован такой факт о проекторах: произведение проекторов на одно подпространство определяется последним сомножителем, а произведение проекторов вдоль одного подпространства определяется первым сомножителем.

Формула (25) для вычитания ($a = -1$) приобретает особенно простой вид:

$$(\Pr(A, B) - \Pr(C, D))^{-1} = \Pr(A, C) - \Pr(B, D). \quad (27)$$

Формула (27) получена в работе [20]. Есть в этой работе и формула, эквивалентная формуле (25) при $a = 1$.

Обратим внимание на тот факт, что в формуле (24) четыре раза встречается псевдообратная от произведения двух ортопроекторов — такое выражение всегда является проектором и может быть задано формулой (5).

Выводы

Формулы (1)–(6), включая лемму, составляют технический аппарат, позволяющий проводить вычисления для различных выражений с матрицами,

Сведения об авторах

Ветошкин Александр Михайлович  — канд. техн. наук, доцент МГТУ им Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), vetkin@mgul.ac.ru

Шум Александр Анатольевич — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры высшей математики ТГТУ, shum@tstu.tver.ru

содержащими вычисления псевдообратных матриц. Формула (6) должна войти в активный арсенал исследователей в линейной алгебре и в численных методах.

Список литературы

- [1] Cline R.E. Representation for the generalized inverse of a partitioned matrix // J. Soc. Industr. Appl. Math., 1964, v. 12, no. 3, p. 588–600.
- [2] Lütkepohl H. Handbook of matrices. NY: Wiley, 1996, 304 p.
- [3] Bernstein D.S. Matrix Mathematics. Theory, Facts, and Formulas. Princeton: Princeton University Press, 2009, 1101 p.
- [4] Воеводин В.В. Энциклопедия линейной алгебры. Электронная система ЛИНЕАЛ. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 544 с.
- [5] Ветошкин А.М. Произведение проекторов. Случай вложенных подпространств // Обзорение прикладной и промышленной математики, 2018. Т. 25. № 3. С. 235–236.
- [6] Anderson W.N.Jr., Duffin R.J. Series and parallel addition of matrices // J. Math. Anal. Appl., 1969, v. 26, pp. 576–594.
- [7] Магнус Я.Р., Нейдеккер Х. Матричное дифференциальное исчисление с приложениями к статистике и эконометрике. М.: Физматлит, 2002. 496 с.
- [8] Беклемишев Д.В. Дополнительные главы линейной алгебры. СПб.: Лань, 2008. 496 с.
- [9] Ветошкин А.М. Компактная форма формулы Клайна // Обзорение прикл. и промышл. матем., 2014. Т. 21. Вып. 4. С. 337–338.
- [10] Ветошкин А.М. Следствия из формулы Клайна // Обзорение прикл. и промышл. матем., 2015. Т. 22. Вып. 4. С. 446–447.
- [11] Campbell S.L., Meyer C.D. Generalized inverses of linear transformations. London: Pitman Pub., 1979, 272 p.
- [12] Cvetković Ilić D. S., Yimin Wei. Algebraic Properties of Generalized Inverses. Singapore: Springer, 2017, 194 p.
- [13] Yanai H., Takeuchi K., Takane Y. Projection Matrices, Generalized Inverse Matrices, and Singular Value Decomposition. Springer, 2011, 234 p.
- [14] Albert A. Regression and the Moor-Penrose pseudoinverse. NY&London: Academic Press, 1972, v. 94, 224 p.
- [15] Barnett S. Matrices: methods and applications. Oxford: Clarendon Press, 1996, 466 p.
- [16] Ben-Israel A., Greville T.N.E. Generalized inverses. Theory and Applications. Springer, 2003, 420 p.
- [17] Meyer C.D. Matrix analysis and applied linear algebra. SIAM, 2000, 718 p.
- [18] Малышев А.Н. Введение в вычислительную линейную алгебру. Новосибирск: Наука, 1991. 400 с.
- [19] Ветошкин А.М., Шум А.А. Строго косые проекторы и их свойства // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 5. С. 122–127. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-5-122-127
- [20] Koliha J.J., Rakocevic V., Straskraba I. The difference and sum of projectors // Linear Algebra and its Applications, 2004, v. 388, p. 279–288.

Поступила в редакцию 17.01.2022.

Одобрено после рецензирования 25.01.2022.

Принята к публикации 04.04.2022.

MATRIX REPRESENTATIONS OF PROJECTORS AND THEIR APPLICATIONS

A.M. Vetoshkin¹✉, A.A. Shum²

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

²Tver State Technical University named after Afanasy Nikitin, 22, Tver, 170026, Russia

vetkin@mgul.ac.ru

The paper proposes a formula for calculating the pseudoinverse matrix for the block matrix $[A:B]$ in the case when the subspaces of the rows of the matrices A and B intersect only at zero ($\{A\} \cap \{B\} = 0$): $[A:B]^+ = \begin{bmatrix} (\tilde{B}A)^+ \\ (\tilde{A}B)^+ \end{bmatrix}$ In this

paper, useful examples of the application of the above formula are considered. The Anderson — Duffin formula is obtained; for two orthoprojectors \hat{A} and \hat{B} . It is established $(A+B-AB-BA)^+ = pp^*p + qq^*q$, where $p = (\tilde{B}\hat{A})^+; q = (\tilde{A}\hat{B})^+$. It is established that the pseudoinverse matrix of the commutator $PP^* - P^*P$ is equal to the sum of four projectors. The pseudoinverse matrix of the sum of two projectors is found.

Keywords: projector, orthoprojector, oblique projector, generalized inverse matrix, Cline's formula

Suggested citation: Vetoshkin A.M., Shum A.A. *Matrichnye predstavleniya proektorov i ikh prilozheniya* [Matrix representations of projectors and their applications]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2022, vol. 26, no. 3, pp. 125–130. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-125-130

References

- [1] Cline R.E. Representation for the generalized inverse of a partitioned matrix. J. Soc. Industr. Appl. Math., 1964, v. 12, no. 3, p. 588–600.
- [2] Lütkepohl H. Handbook of matrices. NY:Wiley, 1996, 304 p.
- [3] Bernstein D.S. Matrix Mathematics. Theory, Facts, and Formulas. Princeton: Princeton University Press, 2009, 1101 p.
- [4] Voevodin V.V. *Entsiklopediya lineynoy algebrы. Elektronnaya sistema LINEAL* [Encyclopedia of linear algebra. Electronic system LINEAL]. Saint Petersburg: BHV-Peterburg, 2006, 544 p.
- [5] Vetoshkin A.M. *Frobeniusovy jendormorfizmy mnozhestva proektorov* [Frobenius endomorphisms of set of projectors]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2012, no. 6(89), pp. 116–122.
- [6] Anderson W.N.Jr., Duffin R.J. Series and parallel addition of matrices. J. Math. Anal. Appl., 1969, v. 26, pp. 576–594.
- [7] Magnus J.R., Neudecker H. *Matrichnoe differentsial'noe ischislenie s prilozheniyami k statistike i ekonometrike* [Matrix differential calculus. With applications in statistics and econometrics]. Moscow: Fizmatlit, 2002, 496 p.
- [8] Beklemishev D.V. *Dopolnitel'nye glavy lineynoy algebrы* [Additional chapters of linear algebra]. Saint Petersburg: Lan', 2008, 496 p.
- [9] Vetoshkin A.M. *Kompaktnaya forma formuly Klayna* [Compact form of the Cline formula]. Obozrenie prikl. i promyshl. matem. [Review app. and industrial Math.], 2014, t. 21, v. 4, pp. 337–338.
- [10] Vetoshkin A.M. *Sledstviya iz formuly Klayna* [Consequences from Clin's formula] Obozrenie prikl. i promyshl. matem. [Review app. and industrial Math.], 2015, t. 22, v. 4, pp. 446–447.
- [11] Campbell S.L., Meyer C.D. Generalized inverses of linear transformations. London: Pitman Pub., 1979, 272 p.
- [12] Cvetković Ilić D.S., Yimin Wei. Algebraic Properties of Generalized Inverses. Singapore: Springer, 2017, 194 p.
- [13] Yanai H., Takeuchi K., Takane Y. Projection Matrices, Generalized Inverse Matrices, and Singular Value Decomposition. Springer, 2011, 234 p.
- [14] Albert A. Regression and the Moor-Penrose pseudoinverse. NY&London: Academic Press, 1972, v. 94, 224 p.
- [15] Barnett S. Matrices: methods and applications. Oxford: Clarendon Press, 1996, 466 p.
- [16] Ben-Israel A., Greville T.N.E. Generalized inverses. Theory and Applications. Springer, 2003, 420 p.
- [17] Meyer C.D. Matrix analysis and applied linear algebra. SIAM, 2000, 718 p.
- [18] Malyshev A.N. *Vvedenie v vychislitel'nyuyu lineynuyu algebrы* [Introduction to Computational Linear Algebra]. Novosibirsk: Nauka, 1991, 400 p.
- [19] Vetoshkin A.M., Shum A.A. *Strogo kosye proektory i ikh svoystva* [Strictly oblique projectors and their properties]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2020, vol. 24, no. 5, pp. 122–127. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-5-122-127.
- [20] Koliha J.J., Rakocevic V., Straskraba I. The difference and sum of projectors // Linear Algebra and its Applications, 2004, v. 388, p. 279–288.

Authors' information

Vetoshkin Aleksandr Mikhaylovich ✉ — Cand. Sci. (Tech), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), vetkin@mgul.ac.ru

Shum Aleksandr Anatol'evich — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor of the TvSTU, shum@tstu.tver.ru

Received 17.01.2022.

Approved after review 25.01.2022.

Accepted for publication 04.04.2022.

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОСАЖДЕНИЯ ТОПЛИВА В БАКАХ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК РАЗГОННЫХ БЛОКОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ МАЛОЙ ПЕРЕГРУЗКИ

А.В. Корольков^{1✉}, В.Б. Сапожников²

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

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5

an_korolkov@mail.ru

Сформулированы проблемы, возникающие при подаче жидкого топлива в двигательную установку разгонных блоков в условиях невесомости. Определены процессы осаждения топлива и сепарации газовых включений под действием предпусковой перегрузки как ключевые. Проведен анализ существующих работ по определению параметров этих процессов. Представлена методика экспериментальных исследований и новый подход к расчетной оценке времени осаждения топлива под действием предпусковой перегрузки.

Ключевые слова: топливный бак, жидкое топливо, сплошность потока, предпусковая перегрузка, время осаждения, сепарация газа, методика эксперимента, теоретическая оценка

Ссылка для цитирования: Корольков А.В., Сапожников В.Б. Моделирование процессов осаждения топлива в баках двигательных установок разгонных блоков под действием малой перегрузки // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 3. С. 131–136. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-131-136

Поведение жидкого топлива и газа наддува в топливных баках летательных аппаратов в условиях свободного (невозмущенного) орбитального (суборбитального) полета определяет нормальное функционирование жидкостных ракетных двигателей (ЖРД). Для летательных аппаратов, находящихся в условиях свободного орбитального (суборбитального) полета, основным условием нормального функционирования ЖРД становится непрерывность подачи компонентов жидкого ракетного топлива в расходные магистрали топливных баков без нарушения сплошности потока. Одним из способов, обеспечивающих такую непрерывность, является осаждение топлива к заборному устройству (расходной магистрали) бака и сепарация газовых включений под действием предпускового ускорения (предпусковой перегрузки), создаваемого вспомогательными ракетными двигателями малой тяги непосредственно перед заполнением расходных магистралей для запуска маршевого двигателя.

Исходя из этого, рассмотрение вопросов о динамике жидкого топлива и газа наддува в топливных баках двигательной установки (ДУ) при переходе от невесомости к перегрузке и решение связанных с ними задач представляют несомненный практический интерес. Трудности теоретического исследования, которое к тому же не всегда гарантирует получение желаемых и достоверных результатов, связаны с процессами осаждения топлива и сепарации газовых включений под действием предпусковой перегрузки.

Нами разработана методика экспериментальных исследований и предложен новый подход к расчетной оценке времени осаждения топлива и сепарации газовых включений под действием предпусковой перегрузки с помощью выполненного ранее численного решения краевой задачи Дирихле [1] и имеющихся теоретических результатов, представленных в работе [2].

До настоящего времени отсутствуют общепринятые методы оценки оптимальной продолжительности действия и величины предпускового ускорения, необходимого для осаждения топлива и сепарации газовых включений из газожидкостных смесей, образующихся в процессе осаждения. Обычно для этой цели используют приближенные соотношения, основанные на оценке продолжительности двух стадий процесса осаждения: 1) стадии прилива жидкого топлива к заборному устройству (входу в расходную магистраль) бака; 2) стадии очищения жидкости от образующихся при этом свободных газовых включений. При использовании такого подхода продолжительность первой стадии оценивают на основании закона свободного падения [3], второй — по эмпирической формуле движения в жидкости твердой сферы некоторого осредненного радиуса под действием архимедовой силы. Проведенные исследования показали, что данная методика оценки может приводить как к завышенным на 50...100 %, так и к заниженным на 30...50 % результатам в зависимости от структуры газожидкостной смеси, коэффициента заполнения бака и величины предпускового ускорения. Недостаточно эффективным является и метод,

изложенный в работе [4], поскольку в основе его также лежит ориентация на некоторый осредненный размер свободного газового включения.

Одной из первых попыток теоретического решения этой задачи следует, по-видимому, считать публикацию [5]. Позднее в работе [6] сообщалось о создании программы для математического моделирования процессов осаждения топлива с использованием метода «метка-ячейка» (МАС). В работе [6] приведена исходная система уравнений и основные приемы ее конечно-разностной аппроксимации, показано, что результаты расчета удовлетворительно совпадают с кинограммами внутрибаковых процессов при экспериментальных исследованиях. Вместе с тем, в ней отмечается, что при пересчете результатов моделирования с маломасштабных моделей на полноразмерные баки наблюдается существенное различие между расчетными и экспериментальными данными, которое объясняется невозможностью точного воспроизведения начальных условий на поверхности раздела фаз. Кроме того, повторение расчетов по методике работы [6] для баков другой формы и при других начальных условиях практически невозможно из-за отсутствия в этой работе необходимой информации.

Учет времен осаждения топлива и сепарации газовых включений под действием предпусковой перегрузки имеют важное значение в разработке внутрибаковых устройств, основанных на капиллярных свойствах пористо-сетчатых материалов [7–20]. В связи с этим в ходе решения практических задач возникает необходимость получения экспериментальных данных по основным закономерностям процесса осаждения топлива.

Цель работы

Цель работы — разработка методики экспериментальных исследований и нового подхода к расчетной оценке времени осаждения топлива и сепарации газовых включений под действием предпусковой перегрузки.

Постановка методики проведения экспериментов

В задаче о динамике процесса осаждения жидкого топлива и сепарации свободных газовых включений из газожидкостных смесей, образующихся в процессе осаждения, при заданной постоянной интенсивности поля массовых сил ng_0 , где $g_0 = 9,8 \text{ м/с}^2$ и n — величина перегрузки, нас интересует время t , в течение которого жидкий компонент топлива будет локализован в районе заборного устройства и очищен от свободных газовых включений. Очевидно, что при заданной степени заполнения (коэффициенте заполнения

бака φ) величина t будет определяться интенсивностью поля массовых сил ng_0 , физическими свойствами жидкости (вязкостью ν , поверхностным натяжением σ и плотностью ρ), и геометрией бака (в виде некоторого характерного размера l). Таким образом, по-видимому, все независимые переменные будут учтены, если записать, что

$$t = f(ng_0, \nu, \sigma, \rho, l). \quad (1)$$

Выражение (1) представляет собой некую функциональную зависимость между шестью размерными величинами. Если размерности этих величин будут выражены в системе СИ, то применяя π -теорему теории подобия [21] к задаче (1), заключаем, что в соответствии с π -теоремой в данном случае $n = 6$, $k = 3$. Тогда функцию (1) можно представить как зависимость трех безразмерных комплексов. Согласно анализу размерностей [3], имеем

$$[t] = [ng_0]^a [\nu]^b [\sigma]^c [\rho]^d [l]^e,$$

или

$$[c] = [m/c^2]^a [m^2/c]^b [kg/c^2]^c [kg/m^3]^d [m]^e. \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что $d = -c$, т. е. число переменных в интересующей нас задаче может быть уменьшено на единицу и тогда

$$t = f_1 \left(\frac{ng_0, \nu, \sigma}{\rho, l} \right). \quad (3)$$

Перепишем уравнение (3) в виде

$$[c] = [m/c^2]^a [m^2/c]^b [m^3/c^3]^c [m]^d. \quad (4)$$

Приравнявая показатели степеней при одноименных размерностях левой и правой частей уравнения (4), можно установить, что искомая зависимость должна иметь вид

$$t \sqrt{\frac{ng_0}{l}} = A(\varphi) \cdot (Bo)^m \cdot (Ga)^n. \quad (5)$$

Здесь $A(\varphi)$ — экспериментально определяемая константа, зависящая от коэффициента заполнения бака φ ; a , m и n — также экспериментально определяемые показатели степеней при числах Бонда

$$Bo = \frac{\rho ng_0 r^2}{\sigma}$$

и Галилея

$$Ga = \frac{ng_0}{\nu^2} r^3.$$

В качестве характерного размера r в числах Бонда и Галилея следует, по-видимому, принимать некий эквивалентный размер (например, радиус) газовой подушки в модели бака перед началом очередного эксперимента.

Теоретическая оценка времени осаждения жидкого топлива

Наихудшая в момент запуска ДУ (с точки зрения обеспечения сплошности потока жидкости на входе в расходную магистраль) ситуация — нахождение жидкости в верхней (относительно главной оси OX) части емкости. При возникновении положительного ускорения основной объем жидкости должен выйти из положения неустойчивого равновесия и занять рабочее положение (войти в контакт с фазоразделительным устройством — ФРУ). На это потребуется определенное время — время осаждения. Оно должно быть много меньше времени работы двигателя на объеме V^* топлива, удерживаемого капиллярными силами в зазоре между стенкой бака и ФРУ. Если отсутствует начальное отклонение поверхности контакта основного объема жидкости от состояния неустойчивого равновесия (а это наиболее неблагоприятное обстоятельство, увеличивающее время осаждения), для оценки времени осаждения можно воспользоваться критерием неустойчивости Рэлея — Тейлора [22]. Критическое волновое число K , ответственное за возникновение движения жидкости после запуска двигателя, зависит от сил плавучести, определяемых возникшим положительным ускорением, и от сил поверхностного натяжения:

$$K^2 = (\rho_1 - \rho_2) \frac{g}{\sigma},$$

здесь ρ_1 — плотность жидкости; ρ_2 — плотность газа.

Плотностью газа можно пренебречь по сравнению с плотностью жидкости (считаем, что число

Атвуда $A = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \approx 1$), поэтому

$$K = \sqrt{\rho_1 \frac{g}{\sigma}}.$$

Если характерный размер (диаметр) поверхности раздела меньше критической длины волны $l = 2 \frac{\pi}{K}$, то жидкость останется неподвижной.

Если в диаметре поверхности укладывается несколько критических длин волны, то возникает ускоренное движение жидкости в сторону ФРУ, сопровождающееся вытеснением газа.

Ускоренному движению центра масс объема жидкости препятствуют капиллярные силы, действующие в вертикальном направлении на искривленной поверхности образующихся «пальцев». Ускорение центра масс жидкости может быть получено из уравнения движения:

$$a = g - \frac{F_s}{M},$$

где F_s — суммарная капиллярная сила;

M — масса жидкости.

Радиусы «пальцев» составляют четверть критической длины волны:

$$r = \frac{\pi}{2K}.$$

Если S — площадь поверхности раздела сред, то количество «пальцев» можно оценить как $K_s = \frac{S}{\pi r^2}$. На каждом «пальце» действует капиллярная сила $F = 2\pi r \sigma$.

Таким образом, уравнение движения приобретает вид

$$a = g \left(1 - \frac{4S}{V\pi} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho g}} \right) = g \left(1 - \frac{4S}{V\pi} \cdot \frac{1}{K} \right),$$

где V — объем жидкости.

Для оценки времени осаждения можно взять время t_r :

$$t_r = \sqrt{\frac{4R_b}{a}}.$$

где t_r — время прохождения центра масс жидкости расстояния $2R_b$

Выводы

Разработана методика экспериментальных исследований и предложен новый подход к расчетной оценке времени осаждения топлива и сепарации газовых включений под действием предпусковой перегрузки.

Список литературы

- [1] Корольков А.В., Сапожников В.Б. Имитационная модель изменения формы газового пузыря в жидкости в условиях реального космического полета // Вестник МГУЛ – Лесной вестник, 2005. № 4. С. 51–52.
- [2] Sapozhnikov V.B., Korolkov A.V. Mathematical modeling of a spacecrafts' fuel tank empty in-gin the orbital flight conditions // International Scientific Conference «Physical and Mathematical Problems of Advanced Technology Development», Moscow, Bauman MSTU, 17–19 November 2014). Moscow: Bauman MSTU Publ., 2014, pp. 80–81.
- [3] Burge G.W., Blackmon J.B., Madsen R.A. Analytical approaches for the design of orbital refueling system // AIAA Paper, 1969, no. 69–567, p. 53.
- [4] Калинин Э.К., Невровский В.А. К оценке времени осаждения жидкости в баке под действием малой перегрузки // Инженерно-физический журнал, 1986. Т. 50. № 6. С. 930–934.
- [5] Математическое моделирование процесса осаждения топлива на дно бака при малых перегрузках / ГОНТИ-4, пер. № СГ-30/76, 1977. 65 с.
- [6] Aydelott J.C., Mjolsness R.S., Torrey M.D., Hochstein J.I. Numerical modeling of in orbit propellant motion resulting from an impulsive acceleration // AIAA/SAE/ASHE/ASEE: 23 Joint Propulsion conf. 29 June – 2 July 1987, San-Diego, Calif., USA. New-York, 1987, 22 p.

- [7] Андреев А.Н., Калязин Э.Л. Расчет проектных параметров внутрибаковых устройств и элементов топливopодающих магистралей ЛА. М.: Изд-во МАИ, 1999. 36 с.
- [8] Александров А.А., Графодатский О.С., Крылов В.И., Лемешевский С.А. Создание научно-производственного центра перспективных изделий из пористых сетчатых материалов для объектов космической отрасли и общепромышленного назначения на базе кооперации ФГУП «НПО имени С.А. Лавочкина» и МГТУ им. Н.Э. Баумана (история, современное состояние и перспективы) // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина, 2017. № 2. С. 17–23.
- [9] Багров В.В., Курпатенков А.В., Поляев В.М. Капиллярные системы отбора жидкости из баков космических летательных аппаратов / под ред. В.М. Поляева. М.: УНПЦ «Энергомаш», 1997. 328 с.
- [10] Сапожников В.Б., Крылов В.И., Новиков Ю.М., Ягодников Д.А. Развитие идей профессора В.М. Поляева по применению пористо-сетчатых материалов для внутрибаковых устройств, обеспечивающих многократный запуск жидкостных ракетных двигателей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, 2006. № 2. С. 78–88.
- [11] Новиков Ю.М., Александров Л.Г., Богданов А.А., Большаков В.А. Проницаемые структуры на основе комбинированного пористого сетчатого металла и сварочная технология производства изделий из них для двигательных установок космических летательных аппаратов // Вестник НПО имени С.А. Лавочкина, 2021. № 1. С. 44–51.
- [12] Новиков Ю.М., Белов С.В., Большаков В.А., Колесников А.Г. Комбинированный пористый материал. Патент РФ № 1632464. МПК4 В 23 К 20/00.; патентообладатель НИИ энергетического машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана; заявл. 04.03.88; регистр. 16.04.94.
- [13] Топливный бак и его заборное устройство. Патент РФ № 2657137. дата приоритета 19.09.2016 г.; дата опубл. 26.03.2018.
- [14] Сапожников В.Б., Полянский А.Р., Корольков А.В., Константинов С.Б., Александров Л.Г. Экспериментальная оценка невырабатываемых остатков топлива в баках с внутрибаковыми устройствами капиллярного типа для двигательных установок космических аппаратов // Инженерный журнал: наука и инновации, 2019. Вып. 12. URL: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-12-1941> (дата обращения 01.10.2021).
- [15] Ушаков В.В., Щербаков А.М. Регулируемый наддув ракетного бака // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина, 2020. № 1. С. 57–61.
- [16] Полуниин Д.А., Миркин Н.Н., Орещенко В.М., Усов Г.Л. Пневмогидравлические системы двигательных установок с жидкостными ракетными двигателями / под ред. Челомея В.Н. М.: Машиностроение, 1978. 240 с.
- [17] Ягодников Д.А., Шацкий О.Е., Лоханов И.В., Карчаев Х.Ж. К 70-летию кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана (устойчивое развитие и преемственность исторических традиций) // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина, 2018. № 3. С. 76–80.
- [18] Александров Л.Г., Константинов С.Б., Корольков А.В., Сапожников В.Б. Топливный бак с капиллярным внутрибаковым устройством космической двигательной установки // Вестник НПО имени С.А. Лавочкина, 2021. № 4 (54). С. 15–21.
- [19] Сапожников В.Б., Полянский А.Р., Корольков А.В., Расчет минимального запаса топлива, находящегося в контакте с внутрибаковым устройством, для обеспечения работы жидкостного ракетного двигателя в условиях невесомости // Инженерный журнал: наука и инновации. 2021. № 3 (111). Статья 4.
- [20] Sapozhnikov V.B., Korolkov A.V., Malashin A.A., Sobolev A.V., Usachyov M.S. Experimental evaluation of rational pre-launch acceleration parameters to provide liquid-propellant rocket sustainer engine launch in microgravity // AIP Conference Proceedings. XLIII Academic Space Conference: Dedicated to the Memory of Academician S.P. Korolev and Other Outstanding Russian Scientists — Pioneers of Space Exploration, 2019, p. 130008.
- [21] Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1977. 440 с.
- [22] Лабунцов Д.А., Ягов В.В. Механика двухфазных систем. М.: Изд-во МЭИ, 2000. С. 143–146.

Сведения об авторах

Корольков Анатолий Владимирович [✉] — д-р физ.-мат. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), an_korolkov@mail.ru

Сапожников Владимир Борисович — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана, sapozhnikov47@mail.ru

Поступила в редакцию 22.12.2021.

Одобрено после рецензирования 28.01.2022.

Принята к публикации 04.04.2022.

MODELING OF PROPELLANT SETTLING PROCESSES IN UPPER STAGES PROPULSION SYSTEMS TANKS UNDER LOW OVERLOAD

A.V. Korol'kov^{1✉}, V.B. Sapozhnikov²

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

²BMSTU, 5, 2nd Baumanskaya st., 105005, Moscow, Russia

an_korolkov@mail.ru

The problems arising when liquid fuel is supplied to the propulsion system of upper stages in zero gravity are formulated. The key processes are the deposition of fuel and separation of gas inclusions under the action of pre-start overload. The analysis of existing works on determining the parameters of these processes is carried out. The method of experimental studies and a new approach to the estimated time of fuel deposition under the action of pre-start overload are presented.

Keywords: fuel tank, liquid fuel, flow continuity, pre-start overload, deposition time, gas separation, experimental methodology, theoretical evaluation

Suggested citation: Korol'kov A.V., Sapozhnikov V.B. *Modelirovanie protsessov osazhdeniya topliva v bakakh dvigatel'nykh ustanovok razgonnykh blokov pod deystviem maloy peregruzki* [Modeling of propellant settling processes in upper stages propulsion systems tanks under low overload]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 3, pp. 131–136. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-131-136

References

- [1] Korol'kov A.V., Sapozhnikov V.B. *Imitatsionnaya model' izmeneniya formy gazovogo puzyrya v zhidkosti v usloviyakh real'nogo kosmicheskogo poleta* [Simulation model for changing the shape of a gas bubble in a liquid under conditions of a real space flight]. *Moscow State Forest University Bulletin – Lesnoy vestnik*, 2005, no. 4, pp. 51–52.
- [2] Sapozhnikov V.B., Korol'kov A.V. Mathematical modeling of a spacecrafts' fuel tank empty in-gin the orbital flight conditions. International Scientific Conference «Physical and Mathematical Problems of Advanced Technology Development», Moscow, Bauman MSTU, 17–19 November 2014). Moscow: Bauman MSTU Publ., 2014, pp. 80–81.
- [3] Burge G.W., Blackmon J.B., Madsen R.A. Analytical approaches for the design of orbital refueling system. AIAA Paper, 1969, no. 69–567, p. 53.
- [4] Kalinin E.K., Nevrovskiy V.A. *K otsenke vremeni osazhdeniya zhidkosti v bace pod deystviem maloy peregruzki* [On the estimation of the liquid settling time in a tank under the action of a small overload]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal [Engineering and Physical Journal]*, 1986, v. 50, no. 6, pp. 930–934.
- [5] *Matematicheskoe modelirovanie protsessa osazhdeniya topliva na dno baka pri malykh peregruzkakh* [Mathematical modeling of the process of fuel deposition on the bottom of the tank at low overloads]. GONTI-4, per. no. SG-30/76, 1977, 65 p.
- [6] Aydelott J.C., Mjolsness R.S., Torrey M.D., Hochstein J.I. Numerical modeling of in orbit propellant motion resulting from an impulsive acceleration. AIAA/SAE/ASHE/ASEE: 23 Joint Propulsion conf. 29 June – 2 July 1987, San-Diego, Calif., USA. New-York, 1987, 22 p.
- [7] Andreev A.N., Kalyazin E.L. *Raschet proektnykh parametrov vnutribakovykh ustroystv i elementov toplivopodayushchikh magistraley LA* [Calculation of design parameters of in-tank devices and elements of aircraft fuel supply lines]. Moscow: MAI Publishing House, 1999, 36 p.
- [8] Aleksandrov A.A., Grafodatskiy O.S., Krylov V.I., Lemeshevskiy S.A. *Sozдание nauchno-proizvodstvennogo tsentra perspektivnykh izdeliy iz poristykh setchatykh materialov dlya ob'ektov kosmicheskoy otrasli i obshchepromyshlennogo naznacheniya na baze kooperatsii FGUP «NPO imeni S.A. Lavochkina» i MGTU im. N.E. Baumana (istoriya, sovremennoe sostoyanie i perspektivy)* [Creation of a research and production center for promising products from porous mesh materials for space industry and general industrial purposes on the basis of cooperation of the Federal State Unitary Enterprise «NPO named after S.A. Lavochkin» and Moscow State Technical University. N.E. Bauman (history, current state and prospects)]. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2017, no. 2, pp. 17–23.
- [9] Bagrov V.V., Kurpatenkov A.V., Polyayev V.M. *Kapillyarnye sistemy otbora zhidkosti iz bakov kosmicheskikh letatel'nykh apparatov* [Capillary Systems for Liquid Extraction from Spacecraft Tanks]. Ed. V.M. Polyayev. Moscow: UNPTS «Energomash», 1997, 328 p.
- [10] Sapozhnikov V.B., Krylov V.I., Novikov Yu.M., Yagodnikov D.A. *Razvitie idey professora V.M. Polyayeva po primeneniyu poristo-setchatykh materialov dlya vnutribakovykh ustroystv, obespechivayushchikh mnogokratnyy zapusk zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Development of the ideas of Professor V.M. Polyayev on the use of porous-mesh materials for intra-tank devices that provide multiple launch of liquid rocket engines]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie [Bulletin of MSTU im. N.E. Bauman. Ser. Engineering]*, 2006, no. 2, pp. 78–88.
- [11] Novikov Yu.M., Aleksandrov L.G., Bogdanov A.A., Bol'shakov V.A. *Pronitsaemye struktury na osnove kombinirovannogo poristogo setchatogo metalla i svarochnaya tekhnologiya proizvodstva izdeliy iz nikh dlya dvigatel'nykh ustanovok kosmicheskikh letatel'nykh apparatov* [Permeable structures based on a combined porous mesh metal and welding technology for the production of products from them for propulsion systems of space aircraft]. *Vestnik NPO imeni S.A. Lavochkina [Bulletin of NPO named after S.A. Lavochkina]*, 2021, no. 1, pp. 44–51.
- [12] Novikov Yu.M., Belov S.V., Bol'shakov V.A., Kolesnikov A.G. *Kombinirovannyi poristy material* [Combined porous material]. RF patent no. 1632464. МПК4 В 23 К 20/00. Patent holder of the Research Institute of Power Engineering MSTU N.E. Bauman; dec. 03/04/88; registered 04/16/94.

- [13] *Toplivnyy bak i ego zabornoe ustroystvo* [Fuel tank and its intake device]. Patent of the Russian Federation No. 2657137.; priority date 09.19.2016; date of publication 03.26.2018.
- [14] Sapozhnikov V.B., Polyanskiy A.R., Korol'kov A.V., Konstantinov S.B., Aleksandrov L.G. *Ekspperimental'naya otsenka nevyrabatyvaemykh ostatkov topliva v bakakh c vnutribakovymi ustroystvami kapillyarnogo tipa dlya dvigatel'nykh ustanovok kosmicheskikh apparatov* [Experimental evaluation of unusable fuel residues in tanks with capillary-type intratank devices for spacecraft propulsion systems]. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovations], 2019, iss. 12. Available at: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-12-1941> (accessed 01.10.2021).
- [15] Ushakov V.V., Shcherbakov A.M. *Reguliruemyy nadduv raketnogo baka* [Adjustable pressurization of the rocket tank]. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2020, no. 1, pp. 57–61.
- [16] Polunin D.A., Mirkin N.N., Oreshchenko V.M., Usov G.L. *Pnevmogidravlicheskie sistemy dvigatel'nykh ustanovok s zhidkostnymi raketnymi dvigatelyami* [Pneumohydraulic systems of propulsion systems with liquid rocket engines]. Ed. V.N. Chelomeya. Moscow: Mashinostroenie, 1978, 240 p.
- [17] Yagodnikov D.A., Shatskiy O.E., Lokhanov I.V., Karchaev Kh.Zh. *K 70-letiyu kafedry «Raketnye dvigateli» MGTU im. N.E. Baumana (ustoychivoe razvitiye i preemstvennost' istoricheskikh traditsiy)* [To the 70th anniversary of the department «Rocket engines» MSTU N.E. Bauman (sustainable development and continuity of historical traditions)]. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina* [Bulletin of NPO named after S.A. Lavochkina], 2018, no. 3, pp. 76–80.
- [18] Aleksandrov L.G., Konstantinov S.B., Korol'kov A.V., Sapozhnikov V.B. *Toplivnyy bak s kapillyarnym vnutribakovym ustroystvom kosmicheskoy dvigatel'noy ustanovki* [Fuel tank with a capillary intra-tank device of a space propulsion system]. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina* [Bulletin of NPO named after S.A. Lavochkina], 2021, no. 4 (54), pp. 15–21.
- [19] Sapozhnikov V.B., Polyanskiy A.R., Korol'kov A.V. *Raschet minimal'nogo zapasa topliva, nakhodyashchegosya v kontakte s vnutribakovym ustroystvom, dlya obespecheniya raboty zhidkostnogo raketnogo dvigatelya v usloviyakh nevesomosti* [Calculation of the minimum fuel supply in contact with an in-tank device to ensure the operation of a liquid-propellant rocket engine in weightless conditions]. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovations], 2021, no. 3 (111), Article 4.
- [20] Sapozhnikov V.B., Korolkov A.V., Malashin A.A., Sobolev A.V., Usachyov M.S. Experimental evaluation of rational pre-launch acceleration parameters to provide liquid-propellant rocket sustainer engine launch in microgravity. AIP Conference Proceedings. XLIII Academic Space Conference: Dedicated to the Memory of Academician S.P. Korolev and Other Outstanding Russian Scientists — Pioneers of Space Exploration, 2019, p. 130008.
- [21] Sedov L.I. *Metody podobiya i razmernosti v mekhanike* [Methods of similarity and dimension in mechanics]. Moscow: Nauka, 1977, 440 p.
- [22] Labuntsov D.A., Yagov V.V. *Mekhanika dvukhfaznykh sistem* [Mechanics of two-phase systems]. Moscow: MEI Publishing House, 2000, pp. 143–146.

Authors' information

Korol'kov Anatoliy Vladimirovich  — Dr. Sci. (Phis.-Math.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), an_korolkov@mail.ru

Sapozhnikov Vladimir Borisovich — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU, sapojnikov47@mail.ru

Received 22.12.2021.

Approved after review 28.01.2022.

Accepted for publication 04.04.2022.

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

РЕГИСТРАЦИЯ И ОБРАБОТКА БИОФИЗИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ДЛЯ НЕИНВАЗИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ЗАБОЛЕВАНИЙ ЧЕЛОВЕКА

М.Е. Рулев^{1,✉}, В.М. Ачильдиев^{1, 2}, Ю.П. Батырев²

¹ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ», 107076, Москва, ул. Матросская Тишина, д. 23, стр. 2

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

maxxim98@yandex.ru

Изложены основы метода информационного анализа электрокардосигналов и указаны разработки на его основе. Представлена блок-схема электросейсмокардиоблока, указаны особенности его конструкции и функциональности. Перечислены исследуемые биофизические сигналы и отмечены их свойства. Обоснован выбор параметров для первичной обработки биофизических сигналов и предложена методика их вычисления. Установлено, что во временной области рационально использовать такие параметры кардиоциклов, как амплитуда, период и площадь. Приведены результаты экспериментов, проведенных над группой пациентов, в целях выявления наиболее показательных параметров кардиоциклов. Предложены способы визуализации и оценки вариабельности кардиоциклов на основе фазового портрета по Такенсу. Выявлено, что на фазовой плоскости точки, соответствующие периодам кардиоциклов, аппроксимируются с помощью эллипса. Определено, что наиболее показательными параметрами эллипса, отражающими вариабельность кардиоциклов, являются площадь, малая полуось и периметр.

Ключевые слова: электрокардиография, сейсмокардиография, гирокардиография, микромеханические датчики, фазовый портрет

Ссылка для цитирования: Рулев М.Е., Ачильдиев В.М., Батырев Ю.П. Регистрация и обработка биофизических сигналов для неинвазивной диагностики заболеваний человека // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 3. С. 137–146. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-137-146

К 2022 г. отмечается стремительное развитие методов неинвазивной диагностики заболеваний сердечно-сосудистой системы в целом, и внутренних органов в частности. На основе информационного анализа вариабельности сердечного ритма, по данным электрокардиографии высокого разрешения, разработаны и исследуются методы неинвазивной диагностики.

Одним из методов скрининга заболеваний внутренних органов человека является информационный анализ электрокардиограмм (ЭКГ) на основе теории информационной функции сердца В.М. Успенского [1]. Данный метод реализован и апробирован в течение 15 лет в диагностической системе «Скринфакс» [2], выявляющей более 30 заболеваний на любой стадии их развития, в том числе на начальном доклиническом этапе и при скрытом бессимптомном течении, в частности аденому простаты, гастрит, гипертонию и желчнокаменную болезнь, злокачественные новообразования, ишемическую болезнь сердца, сахарный диабет, язву желудка и др.

Для расширения списка заболеваний и достоверности диагностики разработан электрокардиоблок (ЭКБ) высокого разрешения [3]. Проведение новых исследований на группах пациентов, усовершенствование программного и аппаратного обеспечения уже позволили расширить до 58 перечень выявляемых заболеваний.

На основе ЭКБ высокого разрешения разработан дистанционный диагностический комплекс (ДДК), включающий в себя удаленный сервер для обработки данных. Он позволит проводить обследования большой группы пациентов одновременно и осуществлять диагностику дистанционно [4].

Наряду с регистрацией электрокардосигналов с помощью трехосного блока микромеханических акселерометров (ММА) и гироскопов (ММГ) возможна регистрация угловых на гирокардиограмме (ГКГ) и линейных на сейсмокардиограмме (СКГ) колебаний грудной клетки (рис. 1).

Для регистрации СКГ и ГКГ был разработан сейсмокардиоблок [5, 6], содержащий трехосные ММА и ММГ с низкими уровнями внутренних шумов. При сопряжении данного блока с ЭКБ высокого разрешения появляется возможность синхронной регистрации кардосигналов с частотой 1000 Гц, что необходимо для использования метода информационного анализа кардосигналов В.М. Успенского [1].

Сейсмо- и гирокардосигналы содержат колебания, вызванные как сердцебиением, так и работой других внутренних органов, и являются интегральными сигналами в отличие от ЭКГ, поэтому совместная обработка электро-, сейсмо- и гирокардосигналов позволит осуществлять комплексный анализ, что приведет к еще большему расширению списка диагностируемых заболеваний и повысит достоверность их выставления [7, 8].

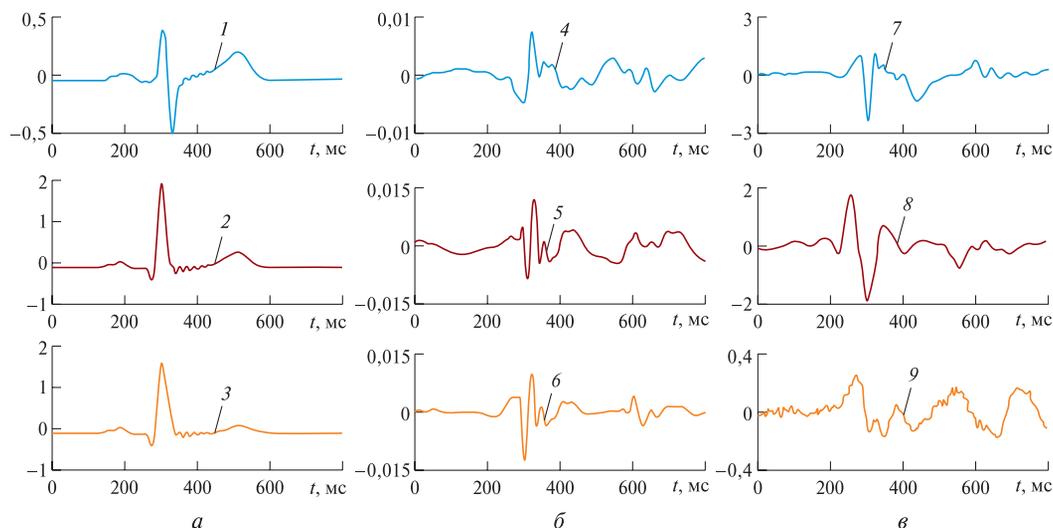


Рис. 1. Усредненные кардиоциклы электро- (а), сейсмо- (б) и гирокардиограмм (г): 1 — первое отведение ЭКГ; 2 — второе отведение ЭКГ; 3 — третье отведение ЭКГ; 4 — СКГ, регистрируемая вдоль оси x ; 5 — СКГ, регистрируемая вдоль оси y ; 6 — СКГ, регистрируемая вдоль оси z ; 7 — ГКГ, регистрируемая вдоль оси x ; 8 — ГКГ, регистрируемая вдоль оси y ; 9 — ГКГ, регистрируемая вдоль оси z

Fig. 1. Averaged cardiocycles of electro- (a), seismo- (b) and gyrocardiograms (g): 1 — first ECG limb lead; 2 — the second limb lead of an ECG; 3 — the third limb lead of an ECG; 4 — SCG recorded along the x axis; 5 — SCG recorded along the y axis; 6 — SCG recorded along the z axis; 7 — MCG recorded along the x axis; 8 — MCG recorded along the y axis; 9 — MCG recorded along the z axis

Цель работы

Цель работы — рассмотрение основных методов цифровой обработки таких биофизических сигналов, как ЭКГ, СКГ и ГКГ, применяемых при неинвазивной диагностике функционального состояния человека.

Объекты и методы исследования

Согласно теории информационной функции сердца В.М. Успенского, амплитуды и интервалы кардиоимпульсов подвергаются амплитудной и частотно-фазовой модуляциям под воздействием сложного комплекса взаимосвязанных процессов в организме. Наблюдаемая динамика кардиоимпульсов носит иррегулярный характер, за которым скрывается структурированная совокупность различных процессов, в том числе патологических. Механизм модуляции — единый для электрических и механических импульсов, генерируемых сердцем [1].

Метод информационного анализа ЭКГ В.М. Успенского включает в себя следующие этапы [9]:

- регистрация ЭКГ высокого разрешения в течение 6...10 мин для получения 600 кардиоциклов;
- предварительная обработка данных: определение пиков ЭКГ, вычисление значений и приращений амплитуды QRS-комплекса — R_n , интервалов между соседними R -пиками T_n и «фазового угла» $\alpha_n = \arctg(R_n / T_n)$;
- дискретизация: кодирование знаков приращений параметров символами А, В, С, D, Е, F;

- векторизация: преобразование кодограммы в вектор частот, используя триграммы;
- постановка диагноза: сравнение полученных результатов с базой заболеваний.

Набор эталонных кодограмм, специфичных для здоровых людей и больных с определенными заболеваниями, составляет базу диагностических эталонов. База данных эталонов, расширяемая за счет накопления новых данных обследований групп пациентов, имеет решающее значение в диагностическом процессе при определении количества заболеваний [1].

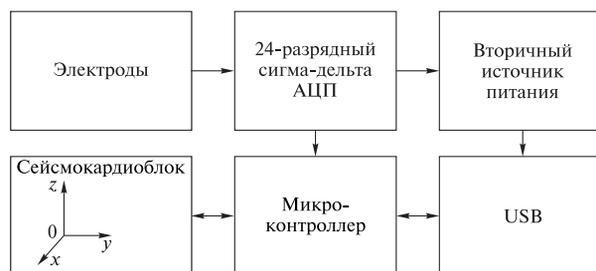


Рис. 2. Блок-схема электросейсмокардиоблока
Fig. 2. Block diagram of the electroseismocardioblock

Для проведения исследований и регистрации кардиосигналов был использован электросейсмокардиоблок (ЭСКБ) [10, 11] (рис. 2). В состав ЭСКБ входят следующие элементы:

- ЭКБ высокого разрешения, способный регистрировать ЭКГ с частотой от 1 до 4 кГц и разрешением 0,2 мкВ;
- электроды, предназначенные для съема ЭКГ по методу Эйтховена [12, 13];

– микроконтроллер, с помощью которого обеспечивается высокая частота передачи и синхронизация данных;

– сейсмокардиоблок (СКБ) на основе МЭМС гироскопов и акселерометров;

– прецизионные вторичные источники питания и малощумящие операционные усилители.

Регистрация СКГ и ГКГ проводится одновременно по трем проекциям и для СКГ, и для ГКГ с частотой 1 кГц и полосой пропускания до 500 Гц. В микроконтроллере ЭСКБ применяется цифровой режекторный фильтр на частоте 50 Гц для трех отведений ЭКГ в целях снижения сетевой помехи.

Диапазон измерения ММГ составляет ± 245 °/с (возможно до 2000 °/с); спектральная плотность шума — 0,011 (°/с)/√Гц (при полосе пропускания 50 Гц), частота в дискретизации — 750 Гц и коэффициент температурной чувствительности — 0,04 (°/с)/°С [15]. Для ММА диапазон измерения составляет ± 2 г, спектральная плотность шума — $4 \cdot 10^{-5}$ г/√Гц, полоса пропускания — 700 Гц и чувствительность — 660 мВ/г [16].

Из названия прибора некорректно можно заключить, что он регистрирует только ЭКГ и СКГ. Однако в переводе с греческого, приставка сейсмо- означает «колебание, землетрясение» [17], а поскольку СКГ и ГКГ фиксируют колебания грудной клетки, то название блока — ЭСКБ полностью отражает его функциональность.



Рис. 3. Измерение биофизических кардиосигналов: 1 — первое отведение; 2 — второе отведение; 3 — третье отведение

Fig. 3. Measurement of biophysical cardiac signals: 1 — first limb lead; 2 — the second limb lead; 3 — third limb lead

При регистрации кардиосигналов электроды ЭСКБ с помощью геля плотно прикрепляются к рукам и ногам по методу Эйтховена (отведения 1, 2 и 3, рис. 3). На нижней границе грудной клетки испытуемого с помощью эластичной ленты плотно фиксируется СКБ. Ось y приборной системы

координат СКБ направлена к голове испытуемого, оси x и y находятся в плоскости, образуемой поверхностью грудной клетки и близкой к анатомической фронтальной плоскости, а ось z направлена перпендикулярно вверх. Измерение кардиосигналов проводится в положении лежа на спине неподвижно в течение 10 мин при равномерном дыхании [14].

Выходные данные прибора с помощью программы сбора данных ЭСКБ записываются в текстовый файл в соответствии с программой, созданной в среде Delphi 2010 [18], которая обеспечивает обмен данными персонального компьютера с ЭСКБ по интерфейсу RS-485 с визуальным контролем полученных значений выходных сигналов. Дальнейшая обработка данных осуществляется с помощью программы, написанной на языке Python 3.7 [19] с использованием библиотек NumPy, SciPy [20], Pandas [21], BioSPPy [22]. Дополнительные исследования проводились в среде MATLAB R2020b [23].

Результаты и обсуждение

Применение метода В.М. Успенского к сигналам СКГ и ГКГ ставит задачу определения характерных пиков сигналов, аналогичных R зубцам ЭКГ, а также параметров, аналогичных параметрам R_n , T_n , и α_n , и их приращений.

Проведенные исследования и испытания на начальной стадии показали, что наиболее выраженные пики имеет проекция СКГ на ось Z и проекции ГКГ на оси X и Y [7]. При этом ЭКГ по второму отведению, как правило, имеет максимальную амплитуду. Сигналы ГКГ и СКГ обладают характерными пиками, хотя и не столь выраженными, как R -зубцы ЭКГ. В связи с этим возможно расширение области применения информационного анализа электрокардиосигналов на сейсмо- и гирокардиосигналы при использовании комбинации разных кардиосигналов (рис. 4):

- ЭКГ, второе отведение;
- СКГ, проекция на ось Z ;
- ГКГ, проекция на ось Y .

Использование предложенной комбинации кардиосигналов с одним отведением ЭКГ позволяет заметно упростить конструкцию ЭСКБ и разместить все датчики в небольшом корпусе, закрепляемом на грудной клетке пациента.

Исследования показали, что знак приращения временных интервалов между пиками T_n совпадает более чем на 95 % для всех видов кардиосигналов. При этом варибельность амплитуд различных кардиосигналов не совпадает [11].

Параметры R_n , T_n , α_n учитывают изменения только одного характерного пика, а не всего кардиосигнала в целом. Параметр α_n (фазовый угол) чувствителен к малейшим колебаниям входных

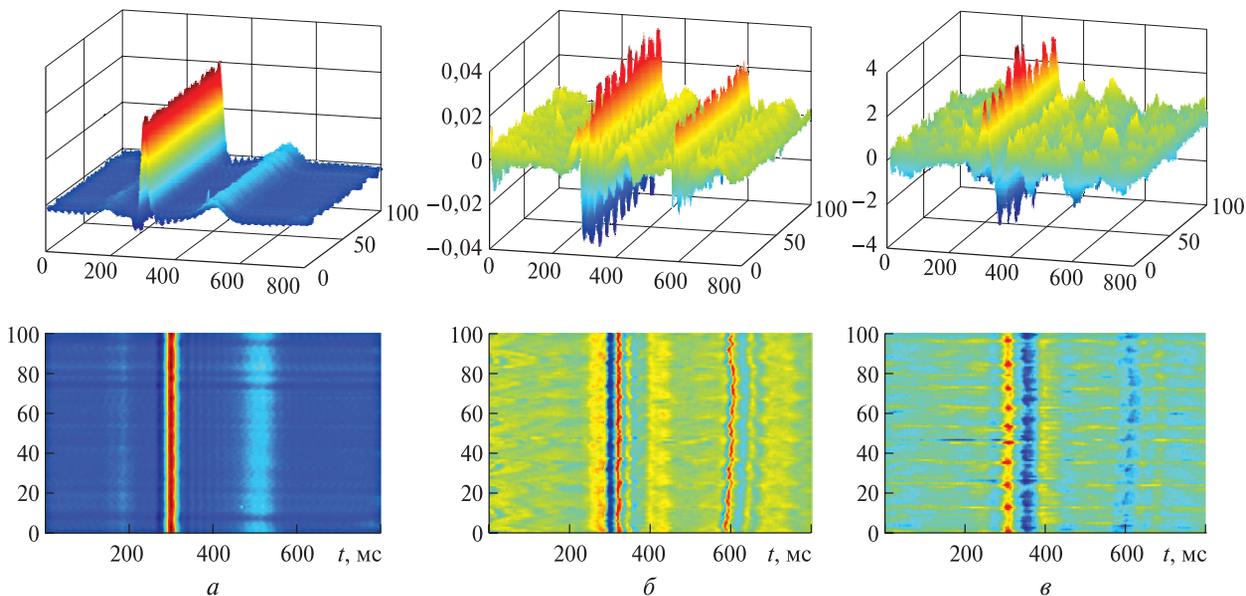


Рис. 4. Биофизические сигналы: *a* — ЭКГ₂, второе отведение ЭКГ; *б* — СКГ_Z, проекция СКГ на ось Z; *в* — ГКГ_Y, проекция ГКГ на ось Y

Fig. 4. Biophysical signals: *a* — ECG₂, ECG limb lead 2; *б* — SKG_Z, projection of the SKG_Z onto the Z axis; *в* — MCG_Y, projection of the MCG onto the Y axis

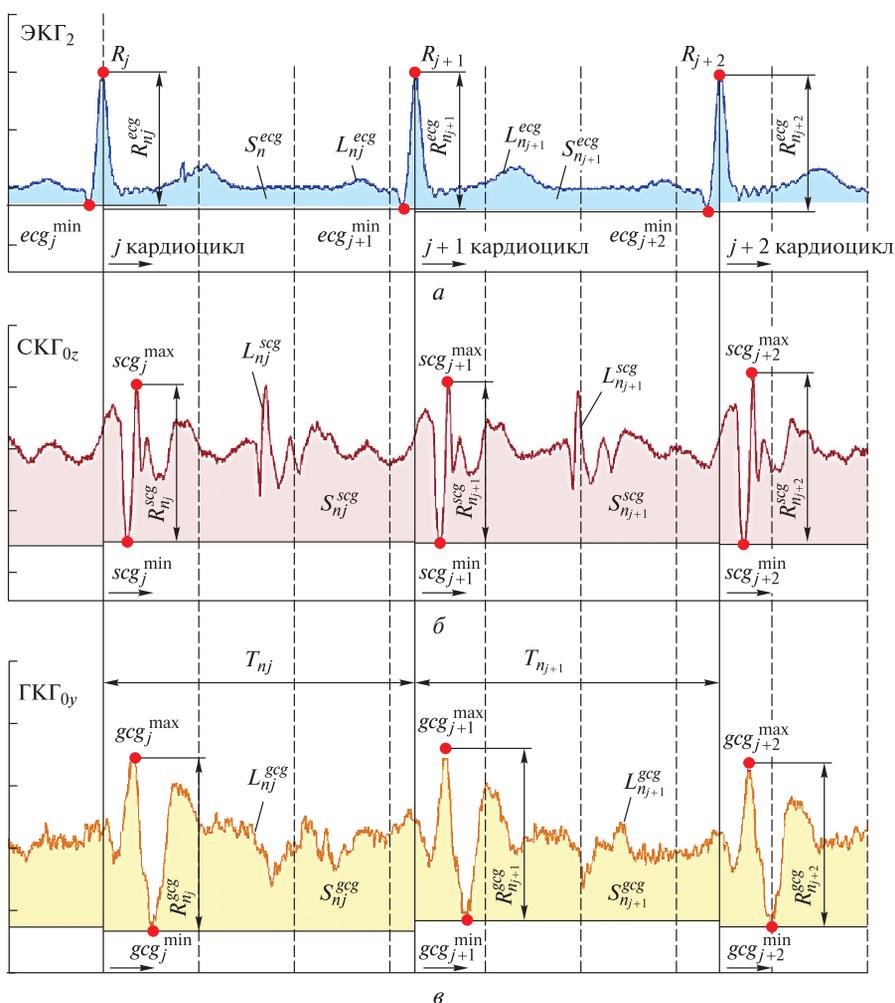


Рис. 5. Параметры R_{norm} , L_{norm} , S_{norm} для электро- (*a*), сейсмо- (*б*) и гироскардиограмм (*в*)

Fig. 5. Parameters R_{norm} , L_{norm} , S_{norm} for electro- (*a*), seismo- (*б*) and gyrocardiograms (*в*)

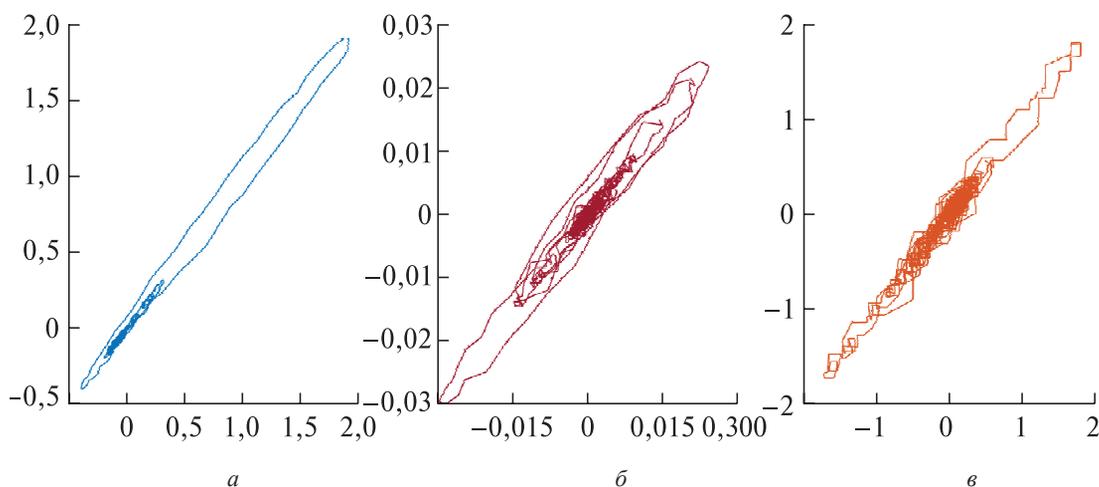


Рис. 6. Фазовые портреты биофизических сигналов по Такенсу: *a* — ЭКГ₂; *б* — СКГ_z; *в* — ГКГ_γ
Fig. 6. Phase portraits of biophysical signals according to Takens: *a* — ECG₂; *б* — SKG_z; *в* — GKY_γ

данных из-за шумов. В связи с этим было решено провести анализ и оценку таких дополнительных параметров, как длина *j*-го кардиоцикла L_n и площадь под кривой *j*-го кардиоцикла S_n [24] (рис. 5).

Для того чтобы провести оценку и сравнение различных параметров кардиосигналов, используемых при информационном анализе, необходимо привести диагностические параметры к безразмерным величинам. Для перехода к относительным единицам использовался коэффициент D_R , который был определен для каждого типа кардиосигнала на основе данных об амплитуде, полученных по результатам проведенных исследований (группа условно здоровых пациентов в количестве 260 чел.). В результате были получены следующие номинальные диапазоны R_n :

$$\begin{aligned} D_R^{\text{ЭКГ}} &= 2,5 \text{ мВ}; \\ D_R^{\text{СКГ}} &= 0,075 \text{ г}; \\ D_R^{\text{ГКГ}} &= 5 \text{ }^\circ/\text{с}. \end{aligned}$$

В связи с этим для сигналов ЭКГ, СКГ и ГКГ размах систолического комплекса R_{norm} , длина кардиоцикла L_{norm} и площадь региона под кривой S_{norm} (индекс norm указывает на безразмерность величин) были рассчитаны по формулам:

$$R_{\text{norm}}^j = \frac{x_{\text{max}}^j - x_{\text{min}}^j}{D_R^{\text{ЭКГ}}} = \frac{R_n^j}{D_R^{\text{ЭКГ}}};$$

$$S_{\text{norm}}^j = \sum_{i=1}^{k_j-1} \frac{1}{D_R^{\text{СКГ}}} \left(\frac{x_i + x_{i+1}}{2} - x_{\text{min}}^j \right) T^*;$$

$$L_{\text{norm}}^j = \sum_{i=1}^{k_j-1} \sqrt{\left(\frac{x_{i+1} - x_i}{D_R^{\text{ГКГ}}} \right)^2 + (T^*)^2},$$

где k_j — количество отсчетов в *j*-м кардиоцикле;

x_i [мВ, г, °/с] — измеренные значения кардиосигналов ЭКГ, СКГ и ГКГ соответственно; $T^* = 1$ — нормированный временной интервал между отсчетами.

В качестве сравнения для кардиосигналов используется понятие вариабельности (изменчивости) параметров сердечного цикла. Согласно методике В.М. Успенского, одним из этапов диагностики заболеваний является анализ приращений параметров сердечного цикла, причем выбираются наиболее изменчивые, т. е. более показательные. Поэтому в качестве параметра для сравнения вариабельности кардиосигналов используется коэффициент вариации CV в соответствии с формулой

$$CV(p) = \frac{\sigma(p)}{M(p)} 100\%,$$

где p — массив параметров, вычисленных для каждого кардиоцикла;

$\sigma(x)$ — среднее квадратическое отклонение параметра p ;

$M(x)$ — математическое ожидание параметра p .

Анализ полученных результатов, приведенных в табл. 1, показал, что наибольшими значениями CV обладают параметры R_{norm} , S_{norm} и α_{norm} . Параметр α_{norm} как результат отношения R_{norm} и T_{norm} (T_{norm} соответствует T_n и считается безразмерным) является очень малой величиной, чувствительной к малейшим изменениям входных данных. Значения параметра L_{norm} близки к значениям T_{norm} , что обусловлено используемым численным методом и не представляют интереса для дальнейшего рассмотрения. При этом коэффициенты вариации CV параметров СКГ и ГКГ заметно больше по сравнению с параметрами ЭКГ. Параметр T_{norm} является диагностически значимым — его эффективность подтверждена многолетним опытом

Т а б л и ц а 1

Значения характерных параметров кардиоциклов испытуемого

The values of the patient's cardiocycles characteristic parameters

Массив параметров (p)		R_{norm}	L_{norm}	S_{norm}	T_{norm}	α_{norm}
ЭКГ	$M(x)$	0,9582	689,2916	123,4856	689,2488	$1,3951 \cdot 10^{-3}$
	$\sigma(x)$	0,0171	42,7065	10,4928	42,7064	$0,8374 \cdot 10^{-4}$
	$CV(x), \%$	1,7837	6,1957	8,4972	6,1961	6,0025
СКГ	$M(x)$	0,8180	689,3950	302,6059	689,2488	$1,1943 \cdot 10^{-3}$
	$\sigma(x)$	0,1056	42,7043	30,8504	42,7064	$1,9069 \cdot 10^{-4}$
	$CV(x), \%$	12,9086	6,1945	10,1949	6,1961	15,9666
ГКГ	$M(x)$	0,7876	689,3597	258,1037	689,2488	$1,1424 \cdot 10^{-3}$
	$\sigma(x)$	0,1172	42,7130	57,4169	42,7064	$1,5109 \cdot 10^{-4}$
	$CV(x), \%$	14,8767	6,1960	22,2457	6,1961	13,2253

Т а б л и ц а 2

Параметры аппроксимирующих эллипсов для пяти испытуемых

Parameters of approximating ellipses for five patients

Параметр	1	2	3	4	5	$CV, \%$
α	44,9986	45,0118	45,0056	45,0341	45,1523	0,1419
X_0	848,2819	675,6177	794,9565	901,6471	820,7835	10,3976
Y_0	848,3050	675,6478	795,0017	901,7018	820,8536	10,3979
$ \vec{r} $	1199,6681	955,4890	1124,2702	1275,1602	1160,8127	10,3978
a	180,3461	32,3848	179,8054	49,2728	34,7142	81,4813
b	64,0708	11,2851	75,2973	19,5270	32,5776	68,8998
k	0,3553	0,3485	0,4188	0,3354	0,9385	53,9760
P	811,8193	145,2997	835,2831	226,3276	211,4211	77,5898
S	$3,6276 \cdot 10^4$	$1,1474 \cdot 10^3$	$4,2505 \cdot 10^4$	$3,0207 \cdot 10^3$	$3,5505 \cdot 10^3$	117,3742
χ^{max}	983,6128	699,8598	932,7696	939,1080	854,4402	12,6892
χ^{min}	712,9858	651,3738	657,1435	864,2013	787,1381	12,3556
γ^{max}	983,6311	699,8979	932,8340	939,1952	854,5202	12,6886
γ^{min}	713,0141	651,3962	657,1700	864,2227	787,1926	12,3556

использования в различных методах информационного анализа ЭКГ [25].

На основании полученных результатов предлагается использовать модификацию метода Успенского для набора сигналов ЭКГ₂, СКГ_Z и ГКГ_Y по параметрам R_{norm} , T_{norm} и S_{norm} [26]. Однако такая модификация потребует создания новой базы диагностических эталонов с последующим продолжительным периодом апробации.

Альтернативным вариантом первичной обработки кардиосигналов может стать анализ параметров кардиоциклов по фазовым портретам по Такенсу [24, 27, 28]. Ниже изображены фазовые портреты по Такенсу для одного кардиоцикла (рис. 6). В этом случае для информационного анализа можно использовать следующие параметры: площадь контура, угол наклона оси, периметр контура и др. Преимуществом метода является одинаковая размерность величин в координатной плоскости, недостатком — сложность вычислений, поскольку контуры кардиоциклов являются

довольно запутанными с геометрической точки зрения.

Еще одним методом обработки кардиосигналов, схожим с методом фазового портрета по Такенсу, является отображение функциональной зависимости $(m+1)$ -периода от m -периода кардиоциклов на фазовой плоскости так, как показано на рис. 7. Плоскость, на которой строят фазовые портреты, также является безразмерной, поскольку по осям абсцисс и ординат откладываются временные интервалы кардиоциклов, которые просто переводятся в отсчеты.

Как видно из рис. 7, внешне форма фазовых портретов (граница расположения точек) кардиосигналов напоминает эллипс, следовательно, на основании данных о периодах можно вычислить и построить аппроксимирующий эллипс, а затем исследовать вариабельность таких его характеристик, как угол наклона эллипса α° , координаты центра эллипса X_0 и Y_0 , длина радиус-вектора $|\vec{r}|$, большая полуось a , малая полуось b , эллиптич-

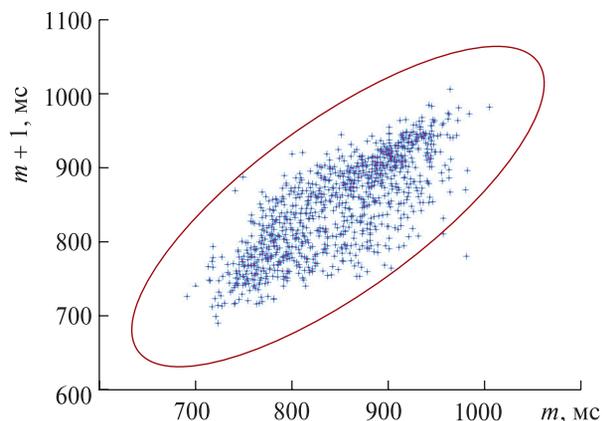


Рис. 7. Зависимость 600 периодов кардициклов и соответствующий аппроксимирующий эллипс

Fig. 7. Dependence of 600 periods of cardiocycles and the corresponding approximating ellipse

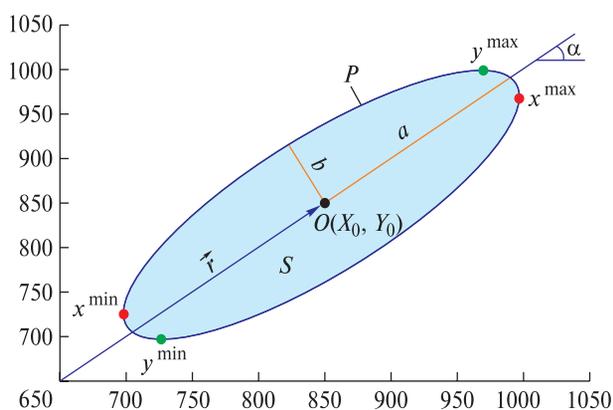


Рис. 8. Идентифицируемые параметры эллипса

Fig. 8. Identifiable parameters of the ellipse

ность k , периметр эллипса P , площадь эллипса S , максимальное и минимальное значения по оси абсцисс X^{\max} и X^{\min} , максимальное и минимальное значения по оси ординат Y^{\max} и Y^{\min} (рис. 8).

К проведению исследований была привлечена многочисленная группа пациентов (табл. 2).

Из табл. 2 видно, что наиболее вариabельными параметрами оказались площадь эллипса S , большая полуось a , а также периметр P , при этом площадь эллипса имеет максимальную вариabельность. Исходя из этого можно утверждать, что использование этих трех параметров (по аналогии с R_{norm} , T_{norm} и S_{norm}) позволит проводить неинвазивную диагностику заболеваний на основе фазового портрета.

Выводы

Таким образом, установлено, что использование сигналов СКГ и ГКГ наряду с ЭКГ позволяет увеличить перечень заболеваний и достоверность метода скрининга заболеваний внутренних органов В.М. Успенского. Выполненная оценка параметров для информационного анализа

кардиосигналов по методу Успенского на основе коэффициента вариации показала наибольшую вариabельность параметров СКГ и ГКГ по сравнению с ЭКГ. При первичной обработке электро-, сейсмо- и гирокардиосигналов во временной области рекомендуется использовать следующий набор параметров: площадь кардицикла, временной интервал между пиками и размах амплитуды систолического комплекса. Предложенный способ первичной обработки кардиосигналов на основе периодов кардициклов в фазовой плоскости показал, что вариabельность кардиосигналов возможно оценить путем построения аппроксимирующего эллипса и определения следующих его параметров: малой полуоси, периметра и площади. С высокой степенью уверенности можно утверждать, что полученные материалы дают возможность увеличить точность диагностики и расширить список диагностируемых заболеваний.

Список литературы

- [1] Успенский В.М. Информационная функция сердца. Теория и практика диагностики заболеваний внутренних органов методом информационного анализа электрокардиосигналов / под ред. В.Б. Симоненко. М.: Планета, 2016. 272 с.
- [2] Успенский В.М., Кравченко Ю.Г., Павловский К.Н., Авербах Ю.И. Устройство экспресс-диагностики заболеваний внутренних органов и онкопатологии. Пат. № 2159574 РФ, заявитель и патентообладатель В.М. Успенский, 2000. Бюл. № 33.
- [3] Грузевич Ю.К., Успенский В.М. Ачильдиев В.М. Электрoкардиоблоки высокого разрешения для скрининг-индикации заболеваний внутренних органов человека // Информационные и телекоммуникационные технологии, 2019. № 40. С. 39–46.
- [4] Ачильдиев В.М., Балдин А.В., Бедро Н.А., Грузевич Ю.К., Жук Д.М., Комарова М.Н., Грызлова Л.В., Роднова И.А., Солдатенков В.А., Успенский В.А., Шаббаев И.Г. Дистанционный комплекс для анализа электрокардиосигналов. Пат. № 2698980 РФ, заявители и патентообладатели ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ», ООО «АРК Системс», 2019. Бюл. № 25.
- [5] Солдатенков В.А., Грузевич Ю.К., Ачильдиев В.М., Бедро Н.А., Евсеева Ю.Н., Басараб М.А., Коннова Н.С. Сейсмокардиоблок и способ измерения сейсмокардицикла. Пат. № 2679296 РФ, заявитель и патентообладатель ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ», 2019. Бюл. № 4.
- [6] Ачильдиев В.М., Басараб М.А., Бедро Н.А., Солдатенков В.А., Евсеева Ю.Н., Грузевич Ю.К., Коннова Н.С., Левкович А.Д. Сейсмокардиоблок на основе микромеханических датчиков // Сб. тр. Юбилейной XXV Санкт-Петербургской междунар. конф. по интегрированным навигационным системам, Санкт-Петербург, 28–30 мая 2018 г. Санкт-Петербург: Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор», 2018. С. 185–194.
- [7] Ачильдиев В.М., Бедро Н.А., Грузевич Ю.К., Евсеева Ю.Н., Комарова М.Н., Рулев М.Е., Солдатенков В.А., Успенский В.М. Гирокардиография как способ неинвазивной диагностики заболеваний. Сб. докл. Междунар. форума «Микроэлектроника-2020» // Наноиндустрия, 2020. № S96–2. С. 381–388.

- [8] Юзбашев З.Ю., Майскова Е.А. Методы исследования сердца, основанные на регистрации низкочастотных колебаний прекардиальной зоны, их диагностические возможности и перспективы // *Scientific Review — Medical Sciences*, 2017. № 5. С. 74–94.
- [9] Успенский В.М. Способ диагностики заболеваний внутренних органов. Пат. № 2407431 РФ, заявитель и патентообладатель В.М. Успенский, 2010. Бюл. № 36.
- [10] Солдатенков В.А., Ачильдиев В.М., Грузевич Ю.К., Левкович А.Д., Бедро Н.А., Комарова М.Н., Евсеева Ю.Н., Басараб М.А., Коннова Н.С., Успенский В.М. Электросейсмокардиоблок для неинвазивной диагностики заболеваний человека // Сб. тр. XXVI Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам, Санкт-Петербург, 27–29 мая 2019 г. Санкт-Петербург: Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор», 2019 г. С. 233–236.
- [11] Ачильдиев В.М., Грузевич Ю.К., Солдатенков В.А., Бедро Н.А., Евсеева Ю.Н., Комарова М.Н., Рулев М.Е., Успенский В.М. Электросейсмогирокардиоблок для скрининга заболеваний человека. Сб. докл. Междунар. форума «Микроэлектроника-2020» // *Наноиндустрия*, 2020. № S5–2. Т. 13. С. 583–593.
- [12] Мурашко В.В., Струтынский А.В. Электrokардиография. М.: Медицина, 1991. 288 с.
- [13] Электрическая ось сердца (ЭОС): суть, норма положения и нарушения. URL: <http://sosudinfo.ru/serdce/eos-elektricheskaya-os-serdca> (дата обращения 18.01.2022).
- [14] Ачильдиев В.М., Евсеева Ю.Н., Бедро Н.А., Солдатенков В.А., Грузевич Ю.К., Комарова М.Н., Левкович А.Д., Успенский В.М. Цифровая обработка и анализ электросейсмокардиосигналов. Сб. докл. Междунар. форума «Микроэлектроника-2020» // *Наноиндустрия*, 2020. № S96–2. С. 374–380.
- [15] MEMS motion sensor: three-axis digital output gyroscope. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/l3gd20h.pdf> (дата обращения 20.01.2022).
- [16] KXR94-7050 Specifications. URL: [https://kionixfs.kionix.com/en/datasheet/KXR94-7050 Specifications Rev 3.pdf](https://kionixfs.kionix.com/en/datasheet/KXR94-7050%20Specifications%20Rev%203.pdf) (дата обращения 21.01.2022).
- [17] Кузнецов С.А. Большой толковый словарь русского языка. СПб.: Норинт, 1998. 1536 с.
- [18] Delphi – Embarcadero Website. URL: <https://www.embarcadero.com/ru/products/delphi> (дата обращения 25.01.2022).
- [19] Python Official Website. URL: <https://www.python.org/about> (дата обращения 25.01.2022).
- [20] NumPy and SciPy Documentation. URL: <https://docs.scipy.org/doc> (дата обращения 25.01.2022).
- [21] Pandas Documentation. URL: <https://pandas.pydata.org/about> (дата обращения 25.01.2022).
- [22] BioSPPY 0.6.1 documentation. URL: <https://biosppy.readthedocs.io/en/stable/biosppy.signals.html#biosppy-signals-ecg> (дата обращения 25.01.2022).
- [23] MATLAB – MathWorks – MATLAB & Simulink Website. URL: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (дата обращения 25.01.2022).
- [24] Achildiev V., Bedro N., Komarova M., Rulev M., Evseeva Y., Uspenskiy V., Gruzevich Y. Gyrocardiography unit for non-invasive human diseases diagnosis // 27th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), 2020. Pp. 1–7. DOI: 10.23919/ICINS43215.2020.9133891.
- [25] Вариабельность сердечного ритма. Стандарты измерения, физиологической интерпретации и клинического использования. URL: <https://www.incart.ru/assets/pdf/hrv-standards.pdf> (дата обращения 27.01.2022).
- [26] Рулев М.Е. Синтез параметров гирокардиоблока // Всерос. студ. конф. «Студенческая научная весна». М.: Издательский дом «Научная библиотека», 2020. С. 368–369.
- [27] Барышева Е.Н., Никишов В.Н. Модели оценки финансовых показателей с учетом их стохастичности и хаотичности // *Вестник Самарского государственного университета*, 2012. № 4. С. 115–126.
- [28] Takens F. Detecting strange attractors in turbulence // *Dynamical Systems and Turbulence. Lecture Notes in Mathematics*. Ed. D.A. Rand, L.S. Young. Heidelberg: Springer-Verlag, 1981, pp. 366–381.

Сведения об авторах

Рулев Максим Евгеньевич  — инженер I категории, ОАО «НПО Геофизика-НВ», аспирант МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), maxxim98@yandex.ru

Ачильдиев Владимир Михайлович — канд. техн. наук, гл. конструктор МНЭМС, ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ», glmneems@gmail.com

Батырев Юрий Павлович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Системы автоматического управления», МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), batyrev@bmstu.ru

Поступила в редакцию 25.02.2022.

Одобрено после рецензирования 03.03.2022.

Принята к публикации 27.04.2022.

BIOPHYSICAL SIGNALS REGISTRATION AND PROCESSING FOR NON-INVASIVE DIAGNOSIS OF HUMAN DISEASES

M.E. Rulev^{1✉}, V.M. Achildiev^{1,2}, Yu.P. Batyrev²

¹Scientific Production Unity «GEOPHIZIKA-NV», 23, bld. 2, Matrosskaya Tishina st., 107076, Moscow, Russia

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

maxxim98@yandex.ru

The basics of the electrocardiosignals informational analysis are outlined and the developments based on it are indicated. A block diagram of the electroseismic cardio unit is presented, the features of its design and functionality are indicated. The studied biophysical signals are listed and their properties are noted. The choice of parameters for the primary processing of biophysical signals is substantiated and a method for their calculation is proposed. It has been established that in the time domain it is rational to use such parameters of cardiocycles as amplitude, period and area. The results of experiments conducted on a group of patients are presented in order to identify the most revealing parameters of cardiocycles. Methods for visualization and evaluation of cardiocycle variability based on the Takens phase are proposed. It was found that on the phase plane the points corresponding to the periods of cardiocycles are approximated using an ellipse. It was determined that the most indicative parameters of the ellipse, reflecting the variability of cardiocycles, are the area, semi-minor axis and perimeter.

Keywords: electrocardiography, seismocardiography, gyrocardiography, MEMS sensors, phase portrait

Suggested citation: Rulev M.E., Achildiev V.M., Batyrev Yu.P. *Registratsiya i obrabotka biofizicheskikh signalov dlya neinvazivnoy diagnostiki zabolevaniy cheloveka* [Biophysical signals registration and processing for non-invasive diagnosis of human diseases]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 3, pp. 137–146.

DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-137-146

References

- [1] Uspenskiy V.M. *Informatsionnaya funktsiya serdtsa. Teoriya i praktika diagnostiki zabolevaniy vnutrennikh organov metodom informatsionnogo analiza elektrokardiosignalov* [Information function of the heart. Theory and practice of diagnosis of diseases of internal organs by the method of information analysis of electrocardiograms]. Moscow: Planeta, 2016, 296 p.
- [2] Uspenskiy V.M., Kravchenko YU.G., Pavlovskiy K.N., Averbakh YU.I. *Ustroystvo ekspress-diagnostiki zabolevaniy vnutrennikh organov i onkopatologii* [Device for rapid diagnosis of diseases of internal organs and oncopathology]. Pat. 2159574 of the Russian Federation, applicant and patent holder of Uspenskiy V.M., 2000, byul. no. 35.
- [3] Gruzevich Yu.K., Uspenskiy V.M. Achil'diyev V.M. *Elektrokardiobloki vysokogo razresheniya dlya skrining-indikatsii zabolevaniy vnutrennikh organov cheloveka* [High-resolution electrocardiography units for screening and indication of diseases of human internal organs]. *Informatsionnyye i telekommunikatsionnyye tekhnologii* [Information and telecommunication technologies], 2019, no. 40, pp. 39–46.
- [4] Achil'diyev V.M., Baldin A.V., Bedro N.A., Gruzevich YU.K., Zhuk D.M., Komarova M.N., Gryzlova L.V., Rodnova I.A., Soldatenkov V.A., Uspenskiy V.A., Shabayev I.G. *Distantsionnyy kompleks dlya analiza elektrokardiosignalov* [Remote complex for analyzing electrocardiosignal]. Pat. 2698980 of the Russian Federation, applicant and patent holder of SPU «GEOPHIZIKA-NV», LLC «ARK Sistems», 2019, byul. no. 25.
- [5] Soldatenkov V.A., Gruzevich YU.K., Achil'diyev V.M., Bedro N.A., Yevseyeva YU.N., Basarab M.A., Konnova N.S. *Seismokardioblok i sposob izmereniya seismokardiotsikla* [Seismic cardioblock and method of measurement of seismic cardiocycle]. Pat. 2679296 of the Russian Federation, applicant and patent holder of SPU «GEOPHIZIKA-NV», LLC «ARK Sistems», 2019, byul. no. 4.
- [6] Achil'diyev V.M., Basarab M.A., Bedro N.A., Soldatenkov V.A., Yevseyeva YU.N., Gruzevich YU.K., Konnova N.S., Levkovich A.D. *Seismokardioblok na osnove mikromekhanicheskikh datchikov* [Cardioseismometer unit based on micromechanical sensors]. 25-th Saint Petersburg international conference on integrated navigation systems (ICINS), 2018, pp. 185–194.
- [7] Achil'diyev V.M., Bedro N.A., Gruzevich YU.K., Yevseyeva YU.N., Komarova M.N., Rulev M.E., Soldatenkov V.A., Uspenskiy V.M. *Girokardiografiya kak sposob neinvazivnoy diagnostiki zabolevaniy* [Gyrocardiography as a method of noninvasive diagnosis of diseases]. Moscow: «TEKHNOFERA», Nanoindustry, 2020, no. 96–2, pp. 381–388.
- [8] Yuzbashev Z.YU., Mayskova E.A. *Metody issledovaniya serdtsa, osnovannyye na registratsii nizkochastotnykh kolebaniy prekardial'noy zony, ikh diagnosticheskiye vozmozhnosti i perspektivy* [Examination methods of the heart based on the registration of low-frequency vibrations of the precardial zone and their diagnostic potentials and perspectives]. *Scientific Review – Medical Sciences*, 2017, no. 5, pp. 74–94.
- [9] Uspenskiy V.M. *Sposob diagnostiki zabolevaniy vnutrennikh organov* [Method of diagnosis of diseases of internal organs]. Pat. 2407431 of the Russian Federation, applicant and patent holder of Uspenskiy V.M., 2010, byul. no. 36.
- [10] Soldatenkov V.A., Achil'diyev V.M., Gruzevich YU.K., Levkovich A.D., Bedro N.A., Komarova M.N., Yevseyeva YU.N., Basarab M.A., Konnova N.S., Uspenskiy V.M. *Elektroseismokardioblok dlya neinvazivnoy diagnostiki zabolevaniy cheloveka* [Electroseismocardiography system for non-invasive human diseases diagnosis]. 26-th Saint Petersburg international conference on integrated navigation systems (ICINS), 2019, pp. 233–236.
- [11] Achil'diyev V.M., Gruzevich YU.K., Soldatenkov V.A., Bedro N.A., Yevseyeva YU.N., Komarova M.N., Rulev M.E., Uspenskiy V.M. *Elektroseismogirokardioblok dlya skrininga zabolevaniy cheloveka* [Electroseismogyrocardiography system for human diseases screening]. Nanoindustry, 2020, no. S5–2, v. 13, pp. 583–593.
- [12] Murashko V.V., Strutynskiy A.V. *Elektrokardiografiya* [Electrocardiography]. Moscow: Medicine, 1991, 288 p.

- [13] *Elektricheskaya os' serdtsa: sut', norma polozheniya i narusheniya* [Electrical axis of the heart: the essence, the norm of position and violations]. Available at: <http://sosudinfo.ru/serdce/eos-elektricheskaya-os-serdca> (accessed 18.01.2022).
- [14] Achil'diyev V.M., Yevseyeva YU.N., Bedro N.A., Soldatenkov V.A., Gruzevich YU.K., Komarova M.N., Levkovich A.D., Uspenskiy V.M. *Tsifrovaya obrabotka i analiz elektroseismokardiosignalov* [Digital processing and analysis of electroseismocardiograms]. *Nanoindustry*, 2020, no. 96–2, pp. 374–380.
- [15] MEMS motion sensor: three-axis digital output gyroscope. Available at: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/l3gd20h.pdf> (accessed 20.01.2022).
- [16] KXR94-7050 Specifications. Available at: [https://kionixfs.kionix.com/en/datasheet/KXR94-7050 Specifications Rev 3.pdf](https://kionixfs.kionix.com/en/datasheet/KXR94-7050%20Specifications%20Rev%203.pdf) (accessed 21.01.2022).
- [17] Kuznetsov S.A. *Bol'shoy tolkovyy slovar' russkogo yazyka* [The Large Explanatory Dictionary of the Russian Language]. St. Petersburg: *Norint*, 1998, 1536 p.
- [18] Delphi – Embarcadero Website. Available at: <https://www.embarcadero.com/ru/products/delphi> (accessed 25.01.2022).
- [19] Python Official Website. Available at: <https://www.python.org/about> (accessed 25.01.2022).
- [20] NumPy and SciPy Documentation. Available at: <https://docs.scipy.org/doc> (accessed 25.01.2022).
- [21] Pandas Documentation. Available at: <https://pandas.pydata.org/about> (accessed 25.01.2022).
- [22] BioSPPy 0.6.1 documentation. Available at: <https://biosppy.readthedocs.io/en/stable/biosppy.signals.html#biosppy-signals-ecg> (accessed 25.01.2022).
- [23] MATLAB – MathWorks – MATLAB & Simulink Website. Available at: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (accessed 25.01.2022).
- [24] Achil'diev V., Bedro N., Komarova M., Rulev M., Evseeva Y., Uspenkiy V., Gruzevich Y. Gyrocardiography unit for non-invasive human diseases diagnosis. 27th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), 2020, pp. 1–7. DOI: 10.23919/ICINS43215.2020.9133891
- [25] *Variabel'nost' serdechnogo ritma. Standarty izmereniya, fiziologicheskoy interpretatsii i klinicheskogo ispol'zovaniya* [Heart rate variability. Standards for measurement, physiological interpretation and clinical use]. Available at: <https://www.incart.ru/assets/pdf/hrv-standards.pdf> (accessed 27.01.2022).
- [26] Rulev M.E. *Sintez parametrov girokardiobloka* [Synthesis of gyrocardiography unit parameters]. All-Russian Student Conference «Student Scientific Spring». Moscow: Publishing House «Scientific Library», 2020, pp. 368–369.
- [27] Barysheva E.N., Nikishov V.N. *Modeli otsenki finansovykh pokazateley s uchetom ikh stokhastichnosti i khaotichnosti* [Models of an estimation of financial parameters in view of their stochasticity and chaotic condition]. *Vestnik of Samara State University*, 2012, no. 4, pp. 115–126.
- [28] Takens F. Detecting strange attractors in turbulence. *Dynamical Systems and Turbulence. Lecture Notes in Mathematics*. Ed. D.A. Rand, L.S. Young. Heidelberg: Springer-Verlag, 1981, pp. 366–381.

Authors' information

Rulev Maksim Evgenyevich✉ — Engineer 1-st category of the «Scientific Production Unity Geophizika-NV» Stock Company, pg. of the BMSTU (Mytishchi branch), maxxim98@yandex.ru

Achil'diev Vladimir Mikhaylovich — Cand. Sci. (Tech.), Chief designer of MNEMS of the «Scientific Production Unity GEOPHIZIKA-NV» Stock Company, glmnems@gmail.com

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

Received 25.02.2022.

Approved after review 03.03.2022.

Accepted for publication 27.04.2022.

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОГО ОБЪЕМА ДОЛГОВРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРОННОГО АРХИВА, ПОСТРОЕННОГО НА ОПТИЧЕСКИХ ДИСКАХ

А.В. Чернышов

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

Рассмотрена задача определения максимально возможного (технически достижимого) объема долговременного электронного архива, построенного на оптических дисках, не объединенных в массивы RAID. Представлена математическая модель, положенная в основу решения задачи, и приведен пример расчета целевого параметра для бюджетного архива небольшой организации. Рассмотрены возможные варианты увеличения целевого показателя при изменении некоторых исходных параметров, означающих снижение надежности хранения информации либо удорожание аппаратных средств обслуживания архива.

Ключевые слова: архивное хранение электронной информации, оптический диск BD-R, параметры, влияющие на емкость архива

Ссылка для цитирования: Чернышов А.В. Определение максимального объема долговременного электронного архива, построенного на оптических дисках // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 3. С. 147–152. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-147-152

Долговременные архивы электронной информации локального типа (в отличие от облачных) вызывают интерес у многих организаций — от крупных корпораций до тех, где числится всего несколько работников. К последним можно отнести, в частности, различные музеи, в том числе краеведческие и школьные, которых ныне насчитывается несколько тысяч [1]. Большинство из них сталкивается с проблемой длительного хранения электронных копий оцифрованных фондов, объем которых иногда может быть значительным (от единиц до десятков и даже сотен терабайт), что неизбежно приводит к созданию электронного архива длительного (десятки лет) хранения информации.

Согласно ГОСТ [2] такие хранилища следует создавать исключительно применяя диски однократной записи (типа WORM). Проведенные нами изыскания [3] показали, что наиболее подходящим типом носителя информации для такого случая являются диски типа BD-R. Однако подавляющее большинство подобных организаций не имеют возможности приобрести дорогостоящее оборудование, автоматизирующее работу с массивами таких дисков (так называемые роботизированные библиотеки оптических дисков), что указано, например, в работах [4–8]. Поэтому для них актуальным остается подход с применением «ручного» метода манипулирования оптическими дисками при выполнении всех регламентных действий по обслуживанию архива [9, 10], среди которых особо выделяют: запись новых дисков,

перемещение их в архив, контроль состояния дисков в процессе их длительного хранения, замена вышедших из строя дисков на новые с восстановлением информации.

Такие действия обычно выполняет один системный администратор на одном компьютере с одним оптическим приводом, поэтому необходимость создания указанного архива обуславливает решение задачи определения его максимально достижимого объема при исходных данных, которые формулируются по условиям работы организации.

Имеющиеся публикации по проблематике создания и сопровождения долговременных электронных архивов на оптических дисках [11–20] не освещают этот вопрос, поэтому поиск ответа на него является актуальным.

Условия задачи

Рассмотрим архив длительного хранения информации, создаваемый на дисках BD-R емкостью $V = 25$ Гб. Каждый диск с записью является самостоятельным носителем (несет на себе полноценный фрагмент информации архива, не требующий для чтения привлечения других дисков, иными словами, диски не объединяются в структуры RAID). Для обеспечения необходимой надежности хранения информации каждый записанный оптический диск дублируется n раз.

Новая информация поступает в архив постепенно в объеме W , в год. Будем считать, что поступающая информация не требует дополнительной обработки и сразу готова для записи на оптические диски.

Процесс записи каждого диска состоит из двух фаз — собственно запись диска и последующая его верификация. Если в процессе верификации обнаружен отказ диска (воспроизведение с ошибками хотя бы части информации либо полная нечитабельность диска), то необходимо повторить запись той же информации на новый диск. Вероятность отказа диска сразу после записи обозначим как q_w , полное время записи одного диска — как t_w .

Диски, записанные в предыдущие годы, следует ежегодно контролировать на целостность. Для этого каждый диск должен быть считан. Наиболее доступным и унифицированным способом контроля корректности считываемой информации является проверка ее контрольных сумм. Обозначим время, необходимое на контроль целостности одного диска, как t_{r0} .

Диск может отказать с вероятностью q . Если обнаружен отказ диска (потеря на нем информации либо полная нечитабельность), то диск подлежит замене на новый. На нем необходимо восстановить информацию. Для этого ее следует считать с запасной копии (попутно выполнив верификацию считанной информации по контрольным суммам). Обозначим необходимое для этого время через t_r . После этого должна быть выполнена уже рассмотренная ранее процедура записи информации на диск, которая потребует времени t_w .

В самом предельном случае сумма всего затраченного времени на запись новых дисков, контроль и восстановление ранее записанных дисков не может превышать одного календарного года (стандарт требует ежегодного контроля целостности информации на архивных дисках). Однако на практике это время (обозначим его T) еще меньше, поскольку, во-первых, системный администратор может выполнять эту работу только в течение рабочего дня, во-вторых, в работе архива необходимо еще выделять время на предоставление доступа к информации сотрудникам и посетителям.

Вполне реальна ситуация, когда объем хранимой в архиве информации станет настолько значительным, что время, необходимое для контроля целостности ранее записанных дисков, начнет занимать в общем объеме времени T столь значительную часть, что новой информации будет записываться все меньше и меньше.

В конце концов, все время T будет затрачено на контроль целостности ранее записанной информации.

Цель работы

Цель работы — определение максимального объема электронного архива W , который может позволить себе небольшая организация при тех или других исходных данных, определяемых, в том числе принятым в ней регламентом работы с архивом.

Расчетная модель

В общем случае для рассматриваемой структуры архива имеем следующую модель заполнения [21]:

1) количество новых записываемых дисков $l_y = \text{const} = \left\lfloor \frac{W_y}{V} \right\rfloor$ до тех пор, пока процесс контроля

ранее записанных дисков будет оставлять достаточно времени для записи l_y новых дисков;

2) количество новых записываемых дисков будет постепенно уменьшаться вплоть до тех пор, пока все время T не начнет уходить только на контроль ранее записанных дисков.

Обозначим через \tilde{t} номер года, в который этап 1 перейдет в этап 2.

Тогда для этапа 1 имеем выражение

$$T \geq \left\lfloor \frac{nl_y}{1-q_w} \right\rfloor t_w + (\tilde{t}-1)nl_y t_{r0} + \left\lfloor (\tilde{t}-1)nl_y q \right\rfloor t_r + \left\lfloor \frac{[(\tilde{t}-1)nl_y q]}{1-q_w} \right\rfloor t_w.$$

После проведения всех преобразований получаем уравнение

$$\tilde{t} = \left\lfloor \frac{T - nAl_y}{nBl_y} \right\rfloor + 1.$$

Начиная с года $t = \tilde{t} + 1$, количество записываемых в год новых дисков будет представлять собой некоторую функцию $l_f(t)$ (этап 2), и можно будет записать выражение

$$T \geq \left\lfloor \frac{nl_f(t)}{1-q_w} \right\rfloor t_w + t_{r0}n \left(\tilde{t}l_y + \sum_{i=1}^{t-\tilde{t}-1} l_f(\tilde{t}+i) \right) + \left\lfloor qn \left(\tilde{t}l_y + \sum_{i=1}^{t-\tilde{t}-1} l_f(\tilde{t}+i) \right) \right\rfloor t_r + \left\lfloor \frac{qn \left(\tilde{t}l_y + \sum_{i=1}^{t-\tilde{t}-1} l_f(\tilde{t}+i) \right)}{1-q_w} \right\rfloor t_w.$$

После преобразований получаем уравнение

$$l_f(t) = \left\lfloor \left(\frac{T}{nA} - \tilde{t}l_y \frac{B}{A} \right) \left(1 - \frac{B}{A} \right)^{t-\tilde{t}-1} \right\rfloor, \quad t > \tilde{t}.$$

Здесь

$$A = \frac{t_w}{1-q_w}; \quad B = t_{r0} + qt_r + \frac{qt_w}{1-q_w}.$$

Заполнение архива в течение нескольких лет

Filling in the archive for several years

Номер года t	Суммарные затраты времени, мин	Записано новых дисков, l_y или $l_f(t)$	Проконтролировано ранее записанных дисков, шт.	Объем информации в архиве W , Гб	Всего дисков в архиве с учетом запасных копий, шт.
1	26961	160	0	4000	800
2	43107	160	160	8000	1600
3	59253	160	320	12000	2400
4	75366	160	480	16000	3200
5	91512	160	640	20000	4000
6	107658	160	800	24000	4800
7	123771	160	960	28000	5600
8	131337	109	1120	30725	6145
9	131229	43	1229	31800	6360
10	131136	17	1272	32225	6445
11	131220	7	1289	32400	6480
12	131073	2	1296	32450	6490
13	131109	1	1298	32475	6495
14	131037	0	1299	32475	6495

Также вычисляем год, после которого запись в архив станет невозможной:

$$t_f = \left\lceil \log_{(1-B/A)} \left(\frac{1}{\frac{T}{nA} - \tilde{l}_y \frac{B}{A}} \right) \right\rceil + \tilde{t} + 1.$$

В связи с тем, что нормальный срок службы оптических дисков с записью самими производителями определяется примерно в 30 лет, для достижения поставленной цели удобно выполнять расчет в табличном процессоре, где каждая строка таблицы будет соответствовать одному году эксплуатации архива. Для этого понадобится не более 30 строк. Рассматривать больший срок хранения дисков в архиве не имеет смысла, так как через 30 лет эксплуатации весь архив должен быть перезаложен на новых носителях и, скорее всего, к тому моменту будут носители уже совершенно другого типа.

Пример расчета по модели

Для выполнения конкретных расчетов рассмотрим наиболее бюджетный вариант архива, при котором в качестве аппаратуры создания и контроля архивных дисков используется обычный персональный компьютер с приводом BD-R. Специализированную аппаратуру для автоматизации работы с дисками закупать не следует. Такой вариант архива может подойти многим небольшим организациям, а, например, для школьных музеев он является единственно возможным.

Зададим следующие исходные данные:

- объем одного оптического диска $V = 25$ Гб;
- вероятность отказа диска с записью при хранении в течение одного года $q = 0,1$;

- вероятность отказа диска в момент записи (брак) $q_w = 0,02$;

- количество запасных копий $n = 5$.

Будем использовать для работы с дисками в архиве не все рабочее время организации, поэтому $T = 131\,400$ минут в год.

Затраты времени на работу с каждым диском определяются применяемой аппаратурой. В случае с одним компьютером с приводом BD-R имеем $t_{r0} = 15$ мин, $t_w = 33$ мин, $t_r = 18$ мин.

В год для записи поступает новая информация в объеме $W_y = 4000$ Гб.

В этом случае имеем результат

$\tilde{t} = 7$ лет;

$t_f = 14$ лет.

Остальные результаты расчета по годам приведены в таблице.

Из таблицы следует, что после года с номером 7 не удастся записывать ежегодно информацию в объеме W_y , а в год с номером 14 (как и показали аналитические расчеты) при заданных исходных данных практически все выделенное время T будет израсходовано на обслуживание ранее записанных дисков, т. е. на запись дисков с новой информацией времени не остается. К этому моменту в архиве будет храниться $W = 32\,475$ Гб информации (немногим более 32 ТБ). Это и есть предельная емкость архива, технически достижимая при сформулированных исходных данных.

Результаты и обсуждение

Между предельно достижимой емкостью архива и надежностью хранения информации (точнее, вероятности потери какого-либо фрагмента информации) существует прямое противоречие.

Так, уменьшая количество запасных копий n с 5 до, например, 4, получаем увеличение вероятности потери информации (конкретные значения вероятностей здесь вычислять не будем), но при этом сможем увеличить технически достижимую емкость архива до $W = 40\ 650$ Гб (при этом $\tilde{t} = 9$, $t_f = 16$).

Значения параметров q , q_w получены в результате анализа доступных публикаций [22–24] и собственных экспериментов автора [25]. Они отражают действительность, и изменять их вряд ли имеет смысл.

Повлиять на значения параметров t_{r0} , t_w , t_r , не увеличивая затраты на аппаратуру (например, не добавляя второй привод BD-R, способный работать параллельно с первым), практически невозможно. Однако если такой привод все же будет добавлен, то можно принять, что значения параметров t_{r0} , t_w , t_r уменьшатся вдвое (на самом деле за то же самое время будет обслужено уже два диска). Тогда (при исходных $n = 5$) удастся достичь емкости архива $W = 65\ 050$ Гб (при $\tilde{t} = 15$, $t_f = 22$).

Изменение параметра W_y (уменьшение либо увеличение) способно повлиять только на время достижения предельной емкости архива, но сама предельная емкость останется прежней.

Увеличение емкости архива возможно за счет увеличения значения параметра T . Рассмотрим предельный случай, когда контроль дисков в архиве выполняется круглосуточно в течение всего года при первоначальных других исходных данных. Для обычного (не високосного) года $T_{\max} = 525\ 600$ мин. В этом случае $W = 130\ 200$ Гб (более 130 ТБ). Правда, при заданном W_y время заполнения такого архива превысит оговоренные нами 30 лет (составит 38 лет). И понятно, что здесь потребуются дополнительные затраты как минимум на зарплату системным администраторам, работающим в три смены.

Выводы

В статье рассмотрена задача определения максимально возможного (технически достижимого) объема электронного архива длительного хранения, построенного на одиночных (не объединенных в RAID) оптических дисках однократной записи. Необходимая надежность хранения информации при этом достигается за счет создания запасных копий информации на таких же дисках.

Установлено, что на максимально возможный объем архива влияют следующие параметры:

– количество запасных копий (параметр коррелирован с надежностью хранения информации в архиве);

– время, необходимое для выполнения операций записи, контроля и восстановления диска (параметр коррелирован с материальными затратами на создание и эксплуатацию архива);

– время, выделяемое в течение года на обслуживание архива (запись новых дисков, контроль и восстановление ранее записанных; это время не может превышать длительности календарного года).

Приведен пример расчета для архива небольшой организации с минимальными аппаратными затратами (один компьютер с приводом BD-R). В соответствии с полученными результатами наиболее реально получить архив с максимально достижимой емкостью (примерно) от 32 ТБ до 40 ТБ, в зависимости от количества выполняемых запасных копий информации, что напрямую влияет на вероятность потери в процессе хранения части информации (вследствие возможного выхода из строя диска с записью в процессе хранения).

Список литературы

- [1] Школьный музей: из века XX — в XXI // Музей, 2010. № 07. С. 70–73.
- [2] ГОСТ Р 54989-2012 / ISO TR 18492:2005 Обеспечение долговременной сохранности электронных документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200096286> (дата обращения 17.05.2021).
- [3] Чернышов А.В. К вопросу о применении оптических дисков для создания долговременных электронных архивных хранилищ информации небольших организаций // Информационные технологии, 2016. Т. 22. № 8. С. 635–640.
- [4] Data Archiver LB-DH8 series. URL: <http://panasonic.net/avc/archiver/lb-dh8/> (дата обращения 01.05.2021).
- [5] Optical Jukeboxes and Libraries: KINTRONIX: IP Security Solutions. URL: <https://kintronics.com/solutions/optical-jukeboxes-and-libraries/> (дата обращения 14.05.2021).
- [6] New Sony Everspan Library System Delivers Reliable Optical Disc Archiving For Data Centers // CDRinfo. URL: <http://www.cdrinfo.com/Sections/News/Details.aspx?NewsId=45763> (дата обращения 14.05.2021).
- [7] Panasonic LB-DM9 series Data Archiver. URL: <http://panasonic.net/avc/archiver/lb-dm9/LB-DM9series-PE.pdf> (дата обращения: 27.09.2021).
- [8] ODS-L10 Optical Disc Archive 10-Slot library. URL: <http://www.pro.sony.eu/pro/lang/en/eu/product/archiving-storage-oda-small-library/ods-l10/overview/> (дата обращения 17.05.2021).
- [9] Юмашева Ю.Ю. Методические рекомендации по электронному копированию архивных документов и управлению полученным информационным массивом. М.: ВНИИДАД, 2012. 125 с.
- [10] Рекомендации по комплектованию, учету и организации хранения электронных архивных документов в государственных и муниципальных архивах. М.: Федеральное архивное агентство. ВНИИДАД, 2013. 49 с.
- [11] Zalaev G.Z., Kalenov N.E., Tsvetkova V.A. Some Issues of Long-Term Storage of Electronic Documents // Sci. Tech. Inf. Proc., 2016, v. 43, no. 4, pp. 268–274. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0147688216040110>
- [12] Corrado E.M., Moulaison H.L. Digital Preservation for Libraries, Archives, and Museums // Libraries and the Academy, 2015, no. 15(2), pp. 375–376. DOI:10.1353/pla.2015.0019
- [13] Акимова Г.П., Пашкин М.А., Пашкина Е.В., Соловьев А.В. Электронные архивы: возможные решения проблем долгосрочного хранения данных // Труды Инсти-

- туда системного анализа Российской академии наук, 2013. Т. 63. № 4. С. 39–49.
- [14] Bradley K. Risks Associated With the Use of Recordable CDs and DVDs as Reliable Storage Media in Archival Collections: Strategies and Alternatives. Paris: UNESCO, 2006, 31 p.
- [15] Smith E. When Discs Die. // Tedium, 2017. URL: <https://tedium.co/2017/02/02/disc-rot-phenomenon/> (дата обращения 18.11.2019).
- [16] Корепанов И. Как сохранить архив на десятилетия? // Журнал сетевых решений/LAN, 2008. № 03. URL: <http://www.osp.ru/lan/2008/03/4899898/> (дата обращения 04.11.2021).
- [17] Российские организации начинают строить электронные архивы на оптических дисках // Ассоциация электронных торговых площадок. URL: <http://www.aetrp.ru/market-news/item/400867> (дата обращения 13.11.2019).
- [18] Haus G., Polizzi C., Visconti A. Preserving cultural heritage: A new approach to increase the life expectancy of optical discs // J. of Cultural Heritage, 2018, vol. 29, pp. 67–74. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.08.004>
- [19] Лобанов А.К. Методы построения систем хранения данных // Jet Info Online, 2003, no. 7. URL: <http://citforum.ru/hardware/data/db/> (дата обращения 05.05.2019).
- [20] Маличенко Д.А. Эвристический алгоритм расчета размеров памяти в многоуровневой системе хранения // Информационно-управляющие системы, 2015. № 5. С. 100–105. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2015.5.100
- [21] Чернышов А.В. Модель планирования количества оптических дисков, необходимых для создания и поддержания долговременного электронного архива. // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления, 2019. Т. 15. Вып. 4. С. 578–591. DOI: <https://doi.org/10.21638/11702/spbu10.2019.413>
- [22] Устинов В. Хранение данных на CD- и DVD-дисках: на наш век хватит? // BROADCASTING: Телевидение и радиовещание, 2006. № 4. URL: http://www.broadcasting.ru/articles2/Oborandteh/hranenie_dannyh_na_CD_DVD_diskah (дата обращения 12.10.2019).
- [23] Пилипчук М.И., Балакирев А.Н., Дмитриева Л.В., Заляев Г.З. Рекомендации по обеспечению сохранности информации, записанной на оптических дисках (Тестирование выборочного массива документов федеральных архивов). М.: Изд-во РГАНТД, 2011. 52 с.
- [24] Zheng J., Slattery O.T. NIST/Library of Congress Optical Disc Longevity Study: Final Report. September, 2007. 32 p. URL: https://www.loc.gov/preservation/resources/rt/NIST_LC_OpticalDiscLongevity.pdf (дата обращения 11.05.2019).
- [25] Чернышов А.В. О результатах тестирования целостности информации на оптических дисках BD-R в электронном архиве за три года хранения. // Новые информационные технологии и системы (НИТиС-2021): Сб. науч. статей по материалам XVIII Междунар. науч.-техн. конф., г. Пенза, 24–26 ноября 2021 г. Пенза: Изд-во ПГУ, 2021. С. 170–173.

Сведения об авторе

Чернышов Александр Викторович — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н. Э. Баумана (Мытищинский филиал), sch@mgul.ac.ru

Поступила в редакцию 17.12.2021.

Одобрено после рецензирования 04.03.2022.

Принята к публикации 18.05.2022.

DETERMINATION OF THE MAXIMUM VOLUME OF A LONG-TERM ELECTRONIC ARCHIVE BUILT ON OPTICAL DISKS

A.V. Chernyshov

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

sch@mgul.ac.ru

The problem of determining the maximum possible (technically achievable) volume of a long-term electronic archive built on optical disks that are not combined into RAID arrays is considered. To achieve the necessary reliability of storing information on the same disks, several backup copies of information are made. The parameters that most significantly affect the target indicator are: the number of backup copies; the time spent on writing, reading, restoring an optical disk; the total time during the year allocated for disk maintenance in the archive. The article shows the mathematical model underlying the solution of the problem, and provides an example of calculating the target parameter for the budget archive of a small organization. Possible options for increasing the target indicator are considered when some initial parameters change, meaning a decrease in the reliability of information storage, or an increase in the cost of archive maintenance hardware.

Keywords: archival storage of electronic information; BD-R optical disk; parameters affecting archive capacity

Suggested citation: Chernyshov A.V. *Opreделение maksimal'nogo ob'ema dolgovremennogo elektronnoyego arkhiva, postroennogo na opticheskikh diskakh* [Determination of the maximum volume of a long-term electronic archive built on optical disks]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 3, pp. 147–152.

DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-147-152

References

- [1] *Shkol'nyy muzey: iz veka XX — v XXI* [School Museum: from the 20th century to the 21st]. Muzey [Museum], 2010, no. 07, pp. 70–73.
- [2] GOST R 54989-2012 / ISO TR 18492:2005 *Obespechenie dolgovremennoy sokhrannosti elektronnykh dokumentov* [Long-term preservation of electronic documents]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200096286> (accessed 17.05.2021).
- [3] Chernyshov A.V. *K voprosu o primeneni opticheskikh diskov dlya sozdaniya dolgovremennykh elektronnykh arkhivnykh khranilishch informatsii nebol'shikh organizatsiy* [To the question of the use of optical discs for the creation of long-term electronic archival storage of information for small organizations]. *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technologies], 2016, v. 22, no. 8, pp. 635–640.
- [4] Data Archiver LB-DH8 series. Available at: <http://panasonic.net/avc/archiver/lb-dh8/> (accessed 01.05.2021).
- [5] Optical Jukeboxes and Libraries: KINTRONIX: IP Security Solutions. Available at: <https://kintronics.com/solutions/optical-jukeboxes-and-libraries/> (accessed 14.05.2021).
- [6] New Sony Everspan Library System Delivers Reliable Optical Disc Archiving For Data Centers. CDRinfo. Available at: <http://www.cdrinfo.com/Sections/News/Details.aspx?NewsId=45763> (accessed 14.05.2021).
- [7] Panasonic LB-DM9 series Data Archiver. Available at: <http://panasonic.net/avc/archiver/lb-dm9/LB-DM9series-PE.pdf> (accessed 27.09.2021).
- [8] ODS-L10 Optical Disc Archive 10-Slot library. Available at: <http://www.pro.sony.eu/pro/lang/en/eu/product/archiving-storage-oda-small-library/ods-l10/overview/> (accessed 17.05.2021).
- [9] Yumasheva Yu.Yu. *Metodicheskie rekomendatsii po elektronnomu kopirovaniyu arkhivnykh dokumentov i upravleniyu poluchennym informatsionnym massivom* [Guidelines for electronic copying of archival documents and management of the received information array]. Moscow: VNIIDAD, 2012, 125 p.
- [10] *Rekomendatsii po kompletovaniyu, uchetu i organizatsii khraneniya elektronnykh arkhivnykh dokumentov v gosudarstvennykh i munitsipal'nykh arkhivakh* [Recommendations for the acquisition, accounting and organization of storage of electronic archival documents in state and municipal archives]. Moscow: Federal Archival Agency. VNIIDAD, 2013, 49 p.
- [11] Zalaev G.Z., Kalenov N.E., Tsvetkova V.A. Some Issues of Long-Term Storage of Electronic Documents. *Sci. Tech. Inf. Proc.*, 2016, v. 43, no. 4, pp. 268–274. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0147688216040110>
- [12] Corrado E.M., Moulaison H.L. Digital Preservation for Libraries, Archives, and Museums. *Libraries and the Academy*, 2015, no. 15(2), pp. 375–376. DOI: [10.1353/pla.2015.0019](https://doi.org/10.1353/pla.2015.0019)
- [13] Akimova G.P., Pashkin M.A., Pashkina E.V., Solov'ev A.V. *Elektronnye arkhivy: vozmozhnye resheniya problem dolgosrochnogo khraneniya dannykh* [Electronic archives: possible solutions to the problems of long-term data storage]. *Trudy Instituta sistemnogo analiza Rossiyskoy akademii nauk* [Proceedings of the Institute of System Analysis of the Russian Academy of Sciences], 2013, v. 63, no. 4, pp. 39–49.
- [14] Bradley K. Risks Associated With the Use of Recordable CDs and DVDs as Reliable Storage Media in Archival Collections: Strategies and Alternatives. Paris: UNESCO, 2006, 31 p.
- [15] Smith E. When Discs Die. *Tedium*, 2017. Available at: <https://tedium.co/2017/02/02/disc-rot-phenomenon/> (accessed 18.11.2019).
- [16] Korepanov I. *Kak sokhranit' arkhiv na desyatileniya?* [How to save the archive for decades?]. *Zhurnal setevykh resheniy/LAN* [Journal of Network Solutions/LAN], 2008, no. 03. Available at: <http://www.osp.ru/lan/2008/03/4899898/> (accessed 04.11.2021).
- [17] *Rossiyskie organizatsii nachinayut stroit' elektronnye arkhivy na opticheskikh diskakh* [Russian organizations are starting to build electronic archives on optical discs]. *Assotsiatsiya elektronnykh torgovykh ploshchadok* [Association of electronic trading platforms]. Available at: <http://www.aetp.ru/market-news/item/400867> (accessed 13.11.2019).
- [18] Haus G., Polizzi C., Visconti A. Preserving cultural heritage: A new approach to increase the life expectancy of optical discs. *J. of Cultural Heritage*, 2018, vol. 29, pp. 67–74. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.08.004>
- [19] Lobanov A.K. *Metody postroyeniya sistem khraneniya dannykh* [Methods for building data storage systems. *Jet Info Online*], 2003, no. 7. Available at: <http://citforum.ru/hardware/data/db/> (accessed 05.05.2019).
- [20] Malichenko D.A. *Evristsicheskiy algoritm rascheta razmerov pamyati v mnogourovnevnoy sisteme khraneniya* [Heuristic algorithm for calculating memory sizes in a multilevel storage system]. *Information and Control Systems*, 2015, no. 5, pp. 100–105. DOI: [10.15217/issn1684-8853.2015.5.100](https://doi.org/10.15217/issn1684-8853.2015.5.100)
- [21] Chernyshov A.V. *Model' planirovaniya kolichestva opticheskikh diskov, neobkhodimyykh dlya sozdaniya i podderzhaniya dolgovremennogo elektronnoy arkhiva* [A planning model for the number of optical discs required to create and maintain a long-term electronic archive]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Prikladnaya matematika. Informatika. Protsessy upravleniya* [Bulletin of St. Petersburg University. Applied Mathematics. Informatics. Management processes], 2019, v. 15, iss. 4, pp. 578–591. DOI: <https://doi.org/10.21638/11702/spbu10.2019.413>
- [22] Ustinov V. *Khraneniye dannykh na CD- i DVD-diskakh: na nash vek khvatit?* [Storing data on CDs and DVDs: enough for our age?]. *BROADCASTING: Televideniye i radioveshchanie* [BROADCASTING: Television and radio broadcasting], 2006, no. 4. Available at: http://www.broadcasting.ru/articles2/Oborandteh/hranenie_dannyh_na_CD_DVD_diskah (accessed 10.12.2019).
- [23] Pilipchuk M.I., Balakirev A.N., Dmitrieva L.V., Zalaev G.Z. *Rekomendatsii po obespecheniyu sokhrannosti informatsii, zapisannoy na opticheskikh diskakh (Testirovaniye vyborochnogo massiva dokumentov federal'nykh arkhivov)* [Recommendations for ensuring the safety of information recorded on optical discs (Testing a selective array of federal archive documents)]. Moscow: RGANTD, 2011, 52 p.
- [24] Zheng J., Slattey O.T. NIST/Library of Congress Optical Disc Longevity Study: Final Report. September, 2007. 32 p. URL: https://www.loc.gov/preservation/resources/rt/NIST_LC_OpticalDiscLongevity.pdf (accessed 11.05.2019).
- [25] Chernyshov A.V. *O rezul'tatakh testirovaniya tselosnosti informatsii na opticheskikh diskakh BD-R v elektronnom arkhive za tri goda khraneniya* [On the results of testing the integrity of information on BD-R optical discs in an electronic archive for three years of storage]. *Novye informatsionnye tekhnologii i sistemy (NITIS-2021): Sbornik nauchnykh statey po materialam XVIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [New information technologies and systems (NITIS-2021): Collection of scientific articles based on the materials of the XVIII International Scientific and Technical Conference], Penza, November 24–26, 2021. Penza: PSU Publishing House, 2021, pp. 170–173.

Author's information

Chernyshov Aleksandr Viktorovich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), sch@mgul.ac.ru

Received 17.12.2021.

Approved after review 04.03.2022.

Accepted for publication 18.05.2022.