

ЛЕСНОЙ ВЕСТНИК / FORESTRY BULLETIN

Научно-информационный журнал

№ 6 ' 2023 Том 27

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ответственный секретарь Расева Елена Александровна

Редактор Л.В. Сивай

Перевод М.А. Карлухиной

Электронная версия Ю.А. Раяжской

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 15.11.2023

Тираж 600 экз.

Заказ №

Объем 26,5 п. л.

Цена свободная

LESNOY VESTNIK / FORESTRY BULLETIN

Scientific Information journal

No. 6 ' 2023 Vol. 27

Editor-in-chief

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

Editorial council of the journal

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

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

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

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

Besschetnov Vladimir Petrovich, Professor, Dr. Sci. (Biol.), Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, Nizhny Novgorod

Bugaev Aleksandr Stepanovich, Academician of the RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow

Burmistrova Olga Nikolaevna, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Ukhta State Technical University, Ukhta

Chubinskiy Anatoliy Nikolaevich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Saint Petersburg State Forest Technical University, St. Petersburg

Chumachenko Sergey Ivanovich, Professor, Dr. Sci. (Biol.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

Deglise Xavier, Dr. Sci. (Agric.), Academician of the IAWS, Academician of the French Academy of Agriculture, Nancy, France

Drapalyuk Mikhail Valentinovich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Rector of VSUFT, Voronezh

Evdokimov Yuriy Mikhaylovich, Professor, Ph. D. (Chemical); academician of the New York Academy of Sciences, corr. Academy of Natural Sciences, a member of the Central Board of Nanotechnology Society of Russia, Moscow

Zalozov 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 politics specialization, George-August-Universitat, Goettingen

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

Lu Haibao, Dr., Tenure-track Professor, Vice Director of the National Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Composites in Special Environments, Harbin Institute of Technology (HIT), China

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

Makuev Valentin Anatol'evich, Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor, BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

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

Martynyuk Aleksandr Aleksandrovich, Academician of the RAS, Dr. Sci. (Agric.), VNIILM, Moscow

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

Moiseyev Aleksandr Nikolaevich, Senior Researcher, European Forest Institute, Joensuu, Finland

Nakvasina Elena Nikolaevna, Professor, Dr. Sci. (Agric.), Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Higher School of Natural Sciences and Technology, Arkhangelsk

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

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

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

Pavlenko Aleksandr Nikolaevich, Corresponding Member of the RAS, Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Kutateladze Institute of Thermophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk

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

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

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

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

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

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

Strekalov Aleksandr Fedorovich, Ph. D. (Tech.), JSC «Tactical Missiles Corporation», Korolev

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

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

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

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 15.11.2023
Circulation 600 copies
Order №
Volume 26,5 p. p.
Price free

СОДЕРЖАНИЕ

БИОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА

Ильинцев А.С., Амосова И.Б. Начальные этапы лесовосстановительной сукцессии на вырубке ельника черничника в северотаежных лесах европейской части России	5
Мохирев А.П., Сульстон С.М., Михайлов П.В., Слинкина О.А., Кулакова Н.Н., Кулаков С.С., Демидко Д.А., Мельниченко Н.П., Горошко А.А. Оценка запасов углерода в нарушенных сибирским шелкопрядом темнохвойных горно-таежных лесах Красноярского края	18
Рунова Е.М., Гарус И.А. Современное состояние водоохранных лесов Братского района Иркутской области	31
Кругляк В.В., Карташова Н.П. Особенности формирования детских площадок для детей с ограниченными возможностями	40
Пинягина Н.Б., Назаренко Е.Б., Горшенина Н.С. Тенденции и факторы изменения показателей внешнеэкономической деятельности предприятий лесного комплекса РФ в 2022 г.	56
Бутко Г.П., Меньшикова М.А., Мехренцев А.В., Тихомиров Е.А., Раменская Л.А., Поротников П.А. Экономическая оценка формирования инновационного лесохозяйственного кластера в Свердловской области	66

ДЕРЕВООБРАБОТКА И ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

Иванкин А.Н., Веревкин А.Н. Рекуперация листового опада в кормовые продукты с высокой биологической ценностью	75
Казарян Л.К., Лоскутов С.Р., Шапченкова О.А., Плящечник М.А., Пермьякова Г.В., Шимова Ю.С. Характеристика продуктов пиролиза послеэкстракционного остатка хвои сосны обыкновенной (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	84
Кононов Г.Н., Веревкин А.Н., Сердюкова Ю.В., Петухов В.А. Древесина как химическое сырье. История и современность. V. Древесная целлюлоза как природное полимерное сырье. Часть II	98

ЛЕСОИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО

Якимович С.Б., Мехренцев А.В. Типизация факторных множеств объектов лесного комплекса и предпроектное обоснование их размещения	114
Брюховецкий А.Н., Скрыпников А.В., Козлов Д.Г., Романов П.В., Бойков П.А., Казачек М.Н. Структурная схема исследования тепловлажностных свойств грунтов лесовозных автомобильных дорог	126
Платонов А.А. Грабли лесные: назначение, область применения, классификация	139

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Ветошкин А.М., Шум А.А. Особенности спектра линейной комбинации двух проекторов	151
Воронцов В.Л. Управление развитием систем информационно-телеметрического обеспечения обработки средств выведения в условиях влияния подрывных технологий	160
Тесленко Е.А., Екимова М.Ю. Математическое описание состояний изучаемых объектов и процессов измерений анализируемых физических систем	178
Шульц А.Н. Вихревой теплообменник для производства тепла и холода	189
Рулев М.Е., Ачильдиев В.М. Регистрация, обработка и анализ информации с электросейсмокардиоблока для диагностики респираторных заболеваний	199

ЮБИЛЕЙ КАФЕДРЫ «ЛАНДШАФТНАЯ АРХИТЕКТУРА И САДОВО-ПАРКОВОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО»

Теодоронский В.С. К 75-летию кафедры «Ландшафтная архитектура и садово-парковое строительство» факультета «Лесное хозяйство, лесопромышленные технологии и садово-парковое строительство» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал). Исторические аспекты	208
--	-----

CONTENTS

BIOLOGICAL AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF FORESTRY

Ilintsev A.S., Amosova I.B. Forest progressive succession early stages in blueberry spruce felling site in Northern Taiga forests of European part of Russia	5
Mokhirev A.P., Sultson S.M., Mikhaylov P.V., Slinkina O.A., Kulakova N.N., Kulakov S.S., Demidko D.A., Melnichenko N.P., Goroshko A.A. Carbon stock assessment in dark coniferous mountain taiga forests of Krasnoyarsk infested by Siberian silkmoth	18
Runova E.M., Garus I.A. Current state of water conservation forests in Bratsk district (Irkutsk region)	31
Kruglyak V.V., Kartashova N.P. Special features of playgrounds for disabled children	40
Pinyagina N.B., Nazarenko E.B., Gorshenina N.S. Trends and factors of changes in foreign economic activities of timber industry companies in Russian Federation 2022	56
Butko G.P., Menshikova M.A., Mekhrentsev A.V., Tikhomirov E.A., Ramenskaya L.A., Porotnikov P.A. Economic assessment of innovative forest cluster formation in Sverdlovsk region	66

WOODWORKING AND CHEMICAL WOOD PROCESSING

Ivankin A.N., Verevkin A.N. Leaf litter recovery into forage products with high biological value	75
Kazaryan L.K., Loskutov S.R., Shapchenkova O.A., Plyashechnik M.A., Permyakova G.V., Shimova Yu.S. Pyrolysis products characteristics of pine needles (<i>Pinus sylvestris</i> L.) post-extraction residue	84
Kononov G.N., Verevkin A.N., Serdyukova Yu.V., Petukhov V.A. Wood as chemical raw material. History and modernity. V. Wood pulp as natural polymer raw material. Part II	98

FOREST ENGINEERING

Yakimovich S.B., Mehrentsev A.V. Factor sets typification of forest complex objects and pre-project placement justification	114
Bryukhovetskiy A.N., Skrypnikov A.V., Kozlov D.G., Romanov P.V., Boykov P.A., Kazachek M.N. Structural diagram of truck haulroads hygrothermal soils properties.....	126
Platonov A.A. Forest rake: purpose, field of application, classification	139

MATH MODELING

Vetoshkin A.M., Shum A.A. Linear combination of two projectors spectrum features	151
Vorontsov V.L. Development management of information and telemetry support systems for launch vehicle under disruptive technologies	160
Teslenko E.A., Ekimova M.Yu. Mathematical description of studied objects states and measurement processes of analyzed physical systems	178
Shults A.N. Vortex heat exchanger for heat and cold generation	189
Rulev M.E., Achildiev V.M. Registration, processing and analysis of information from electroseismocardiography system for respiratory diseases diagnostics.....	199

ANNIVERSARY OF THE DEPARTMENT «LANDSCAPE ARCHITECTURE AND LANDSCAPE AND PARK CONSTRUCTION»

Teodoronskiy V.S. To the 75th anniversary of the Department «Landscape Architecture and Garden and Park Construction» of the Faculty «Forestry, Forestry Technologies and Garden and Park Construction» of the Bauman Moscow State Technical University (Mytishchi branch). Historical aspects	208
--	-----

НАЧАЛЬНЫЕ ЭТАПЫ ЛЕСОВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ СУКЦЕССИИ НА ВЫРУБКЕ ЕЛЬНИКА ЧЕРНИЧНИКА В СЕВЕРОТАЕЖНЫХ ЛЕСАХ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ

А.С. Ильинцев^{1, 2✉}, И.Б. Амосова²

¹ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства» (СевНИИЛХ), Россия, 163062, г. Архангельск, ул. Никитова, д. 13

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

a.ilintsev@narfu.ru

Представлены материалы изучения трехлетней динамики формирования растительного покрова на ранних этапах восстановительной сукцессии. Показана динамика всходов, подростка, подлеска, травяно-кустарничкового и мохового ярусов. Установлены увеличения общего проективного покрытия ярусов, внедрение новых видов, наиболее явно проявляющееся в колеях, межколеинном пространстве и в пределах переувлажненной пасаки. Определено повышение фитоценотической значимости основных фоновых видов данного типа леса и видов сочетающих виолентную и эксплерентную стратегии. Выявлено преобладание типичных бореальных групп среди ценоотических групп при увеличении доли водно-болотной группы на третий год наблюдений. Установлено, что на 1–2-й годы после вырубки наблюдается обильное появление всходов березы — в 15–30 раз больше, чем всходов ели и сосны. Получены данные, что на 3-й год учета большая часть отмеченных всходов и самосева перешли в стадию подростка, а густота подростка в пасаках увеличилась с 800 до 7233 шт./га вследствие наличия мелкого подростка березы, в колеях количество подростка при четырех проходах форвардера было в 10 раз меньше, нежели в пасаках, при восьми проходах форвардера — в 7 раз, при десяти проходах — в 17 раз меньше. Отмечена схожая динамика в возобновлении подлеска. Рекомендуется, согласно принципам устойчивого лесопользования, ограничение и минимизация отрицательных экологических последствий при многократном проезде лесозаготовительной техники с помощью совершенствования технологий лесосечных работ.

Ключевые слова: сплошная рубка, форвардер, количество проездов, живой напочвенный покров, всходы, подрост, подлесок

Ссылка для цитирования: Ильинцев А.С., Амосова И.Б. Начальные этапы лесовосстановительной сукцессии на вырубке ельника черничника в северотаежных лесах европейской части России // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 6. С. 5–17. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-5-17

Концепция устойчивого лесопользования [1–4] направлена на способы проведения лесоводственной практики применительно к различным типам леса и формирование управляемых целей. Для устойчивого лесопользования важное значение имеет обеспечение успешного восстановления лесных экосистем, возобновление коммерческих древесных пород после различных видов рубок [5], а также сохранение и поддержание биологического разнообразия.

В бореальных лесах практически повсеместно применяются сплошные рубки, которые приводят к существенным изменениям экологических характеристик, процессов и функций [6, 7]. Используемая современная лесозаготовительная техника в результате многократных проездов изменяет свойства почвы [8], количество проездов техники значительно влияет на степень и масштаб повреждения почвы. В большинстве исследований [9–11] указывается, что уплотнение почвы в течение первых нескольких проездов техники

становится самым высоким, после чего плотность почвы характеризуется определенным значением, постепенно возрастающим в зависимости от дальнейшего количества проездов и их глубины. Таким образом, рубка древостоя наряду с прямым (механическим, техническим) воздействием, например, на нижние ярусы растительности, оказывает влияние на их дальнейшую сохранность и рост через абиотические факторы, к которым относятся в первую очередь микроклиматические. Все это придает большое теоретическое и практическое значение изучению воздействия рубок леса на стабильность лесных экосистем.

Усиление механизации процесса лесосечных работ, которое связано с расширением площадей для заготовки древесины, поднимает вопросы об экологическом воздействии применяемой лесозаготовительной техники на лесную среду и ее последующем влиянии на продуктивность участков лесного фонда [12]. Степень и масштабы нарушений напочвенного покрова зависят от интенсивности лесозаготовок, применяемого оборудования и методов по снижению негатив-

ных воздействий лесозаготовок на лесную среду [13, 14]. Нарушения различаются по затронутому пространству, по интенсивности — от таких обширных и тяжелых, как дороги и лесопогрузочные площадки до других — более ограниченных и относительно легких, в частности трелевочных волоков (технологических коридоров) и открытых окон [14]. Трелевочные волоки покрывают в среднем около 10 % площади лесосек в умеренных и тропических лесах [15–17]. В некоторых случаях площадь покрытия трелевочных волоков превышает 20 % [18]. В бореальных лесах площадь магистральных и пасечных волоков может достигать 30 % при использовании многооперационной техники [19].

Аутоэкология древесных пород разнообразна, а их реакция на нарушения неспецифическая [14]. По этой причине затруднительно найти равновесие между минимизацией последствий рубок, которые наносят ущерб некоторым экосистемным функциям и видам, и содействием естественному возобновлению древесных пород, которое необходимо для долгосрочной экономической жизнеспособности лесов и устойчивого лесопользования. Для понимания воздействия рубок важно знать масштаб и степень повреждения почвы, как они влияют на возобновление растительного покрова и как долго их воздействие сохраняется.

Цель работы

Цель работы — определение динамики восстановления нижних ярусов растительности на волоках с разным количеством проездов груженого форвардера и не покрытых порубочными остатками в черничном типе леса северотаежного лесного района европейской части Российской Федерации.

Объекты и методы исследования

В соответствии с лесорастительным районированием объекты исследования расположены в северотаежном районе европейской части Российской Федерации на территории Емецкого лесничества Архангельской области. До сплошной рубки исходный участок леса имел следующие характеристики: состав древостоя — 8Е2Б+С, класс возраста — 8, полнота — 0,6, запас древесины — 115 м³/га, тип леса — черничный (местами черничный влажный), класс бонитета — V, почва — подзол грубогумусный поверхностно-осветленный иллювиально-железистый контактно-осветленный на двучленных моренных отложениях (тяжелосуглинистая морена, перекрытая покровными супесями).

В летний период 2020 г. на действующей лесосеке заложили опытно-производственный участок с вариантами разного количества проездов груженого восьмиколесного форвардера Ponsse

Buffalo King [8]. Опыт был поставлен в трех повторностях на пройденных рубкой 18-метровых пасеках без покрытия мест проезда форвардера порубочными остатками. Количество проездов составило 4, 8 и 10. За один проход принимался один рейс форвардера с грузом древесины массой 13 т. Максимальное количество проездов было ограничено свойствами почвы и подстилающих грунтов. Заложили 12 постоянных пробных площадей (далее ПП) размером 20×5 м, охватывающих как варианты количества проездов форвардера — волока, так и пасеки, где не было проездов техники. Таким образом, в пределах участка заложено по три ПП в пределах пасек, 4-х краного проезда форвардера, 8-ми и 10-ти кратного, соответственно.

В каждой ПП выделили четыре учетные площадки размером 5×5 м. Варианты опыта сгруппировали следующим образом: П — пасека, ДПК — часть волока до колеи и после колеи, МК — часть волока между колеями, К — колеи на волоке. Далее для обозначения количества проездов форвардера ставили соответствующие цифры перед вариантами опыта: 4ДПК/8ДПК/10 ДПК, 4МК/8МК/10 МК, 4К/8К/10К.

В полевой период 2020–2022 гг. на данных учетных площадках проводили эколого-биологическую оценку живого напочвенного покрова с помощью современных методических подходов [20], идентификацию видового состава сосудистых растений и мхов — с помощью определителей [21, 22]. Латинские названия таксонов приведены по С.К. Черепанову [23] с уточнениями (по отдельным видам) согласно сайту [24].

Для всех сосудистых растений по всем вариантам опыта указывали проективное покрытие в процентах в пределах каждой учетной площадки и рассчитывали коэффициент встречаемости по формуле

$$B = (N_{\text{уч}} / N_{\text{об}}) \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где B — встречаемость;

$N_{\text{уч}}$ — число учетных площадок, на которых отмечен вид;

$N_{\text{об}}$ — общее число учетных площадок.

Константность видов определяли по шкале постоянства видов (в пределах одного варианта опыта):

1-й класс — вид встречается в 1...20 %;

2-й класс — 21...40 %;

3-й класс — 41...60 %;

4-й класс — 61...80 %;

5-й класс — 81...100 % описаний.

Для того чтобы учесть проективное покрытие и встречаемость видов напочвенного покрова, использовался фитоценотический индекс (индекс Понятовской — Сырокомской, индекс

фитоценотической значимости) [25, 26], его рассчитывали по формуле

$$D = B \cdot P_{\text{ср}}, \quad (2)$$

где D — индекс фитоценотической значимости (ИФЗ);

B — встречаемость;

$P_{\text{ср}}$ — среднее проективное покрытие по всем учетным площадкам, в пределах одного варианта опыта.

Для более наглядной интерпретации данных ИФЗ логарифмировали и присваивали ему класс [26]:

1-й класс — $\log D < 0,4$;

2-й класс — $0,4 < \log D < 1,3$;

3-й класс — $1,3 < \log D < 2,4$;

4-й класс — $2,4 < \log D < 3,0$;

5-й класс — $\log D > 3,0$.

Сравнительную флористическую оценку проводили с использованием индекса П. Жаккара

$$IJ = c / a + b - c \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где a — общее число видов в первом описании;

b — число видов во втором описании;

c — число видов, общих для двух сравниваемых сообществ.

Если $J < 50 \%$, то сходство невелико, если $J > 50 \%$, то сходство велико.

Для дополнительной интерпретации собранных данных использовали элементы экологического анализа. Определяли жизненные стратегии видов по системе Раменского — Грайма [27, 28] и эколого-ценотические группы по Л.Б. Заугольной [29].

Учет всходов, самосева, подроста и подлеска провели на тех же учетных площадках. К подросту относили все растения с диаметром ствола на высоте 1,3 м от поверхности земли < 6 см, который при учете классифицировали по древесным породам, жизнеспособности и категориям крупности с разделением на мелкие (высота до 0,5 м), средние (высота от 0,51 м до 1,5 м), крупные (высота более 1,51 м). Для подлеска учитывали видовой состав, количество и категории крупности. По материалам учета определяли количество подроста и подлеска на 1 га, состав по породам и размещение по площади.

Результаты и обсуждение

Видовой состав растений травяно-кустарничкового и мохового ярусов в целом типичен для хвойных лесов зеленомошного типа. Преобладает бореально-евразийская группа наиболее характерная для лесной таежной зоны европейской части РФ [30].

В динамике общего проективного покрытия за трехлетний период можно выделить некоторые изменения (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Динамика общего проективного покрытия живого напочвенного покрова за 2020–2022 гг., %

Dynamics of the total projective coverage of the living ground cover, %

Вариант опыта*	Травяно-кустарничковый ярус			Моховый ярус		
	2020	2021	2022	2020	2021	2022
П	15	20	51	80	65	30
4ДПК	10	20	37	9	10	20
4МК	25	30	37	15	19	20
4К	0,1	0,2	5	10	6	22
8ДПК	10	20	34	8	8	15
8МК	10	30	34	9	11	15
8К	0	0,2	6	5	2	10
10ДПК	10	20	33	10	9	13
10МК	10	20	33	10	10	17
10К	0	0,1	1	0,1	1	18

*Цифры 4, 8, 10 обозначают количество подходов форвардера.

По травяно-кустарничковому ярусу во всех вариантах опыта прослеживается плавное увеличение проективного покрытия. Наиболее резко покрытие возрастает в пределах колеи, где отличается вариант опыта с 10 проходами форвардера по наиболее обводненным участкам. Только на третий год наблюдений по стенкам колеи появились сосудистые растения и разрослись мхи. Моховый ярус не имеет четких изменений в проективном покрытии между вариантами опыта. Так, в пределах пасеки происходит снижение покрытия мхами, в остальных вариантах опыта — плавное увеличение или последовательная динамика не наблюдалась. На 3-й год наблюдений зафиксированы максимальные значения проективного покрытия.

Необходимо отметить, что скорее всего, ярко выраженной динамики в каком-либо одном из направлении в последующие два года не будет. Полевой сезон 2022 г. отличался высокими значениями температуры воздуха небольшим количеством осадков. Это отразилось прежде всего на моховом покрове — местами сильно высохшем ярусе. Вследствие таких погодных условий снизилось количество воды в колеях, и на данные участки внедрились новые виды растений.

В течение трехлетнего мониторинга видовой состав на изучаемых учетных площадках изменялся незначительно, внедрение новых видов было единичным, что подтверждает высокий индекс флористического сходства между вариантами опыта (табл. 2).

Большая часть видов, не типичных для зеленомошных типов леса, появилась в пределах колеи,

Т а б л и ц а 2

**Оценка сходства видового состава травяно-кустарничкового яруса
между вариантами опыта в динамике (индекс Жаккара)**

Assessment of the similarity of the species composition of the grass-shrub storey
between the variants of the experiment in dynamics (Jacquard index)

Вариант опыта	П	4ДПК	4МК	4К	8ДПК	8МК	8К	10ДПК	10МК	10К
П	58	40	30	8	28	31	0	60	28	0
	77	56	37	44	35	36	33	54	47	30
	51	54	42	58	31	32	36	49	49	45
4ДПК		56	33	20	70	36	0	47	31	0
		81	70	68	52	55	58	54	65	53
		50	61	65	75	57	57	64	65	52
4МК			53	20	54	46	0	47	42	0
			78	67	58	61	75	59	63	59
			50	60	68	71	65	65	59	59
4К				14	29	22	0	13	29	0
				48	75	69	73	65	81	56
				10	65	50	63	76	64	64
8ДПК					50	45	0	47	40	0
					71	80	73	74	81	56
					47	75	72	71	74	57
8МК						57	0	41	33	0
						73	79	60	69	60
						47	71	62	63	55
8К							0	0	0	0
							65	63	69	92
							0	68	70	55
10ДПК								70	38	0
								67	70	58
								64	70	78
10МК									47	0
									65	53
									32	71
10К										0
										53
										0

Примечание. В каждой ячейке приведены три значения индекса Жаккара, представленные по годам мониторинга. Желтым цветом выделены ячейки, где представлены значения индекса в пределах одного варианта опыта: одно значение — между 1-м и 2-м годами мониторинга, два — между 2-м и 3-м годом, три — между 1-м и 3-м годом. Полу жирным выделены минимальные и максимальные значения индекса Жаккара.

а также в пределах переувлажненной пасеки, расположенной в естественном понижении рельефа, между волоками 8-го и 10-го вариантов опыта. Сравнивая индекс Жаккара между вариантами опыта можно отметить некоторые особенности.

Минимальные значения индекса Жаккара в большинстве вариантов опыта наблюдаются в первый год мониторинга. Самые низкие значения зафиксированы по сравнению с вариантом опыта 4К. Для первого года мониторинга расчет индекса не проводился для вариантов 8К и 10К, так как не

было зафиксировано ни одного растения (сильное механическое воздействие форвардером и обильные осадки не позволили заселиться ни одному растению). Данные участки волока (в пределах вариантов опыта 8К и 10К) были значительно обводнены, чему способствовало большое количество осадков в этом вегетационном сезоне.

Пасека имеет наиболее низкие значения по сравнению с вариантами при восьми и десяти проходах форвардера — менее 50 практически все три года мониторинга. Это указывает на более

Т а б л и ц а 3

Процентное соотношение классов встречаемости в течение трех лет

Percentage of occurrence classes over three years

Год наблюдения	Класс встречаемости	Вариант опыта										
		П	4ДПК	4МК	4К	8ДПК	8МК	8К	10ДПК	10МК	10К	Ср.
1	1	54	40	22	50	16	56	0	47	57	0	34
	2	14	10	11	50	28	22	0	20	0	0	16
	3	25	10	2	0	28	0	0	13	0	0	10
	4	0	20	11	0	0	0	0	7	15	0	5
	5	7	20	34	0	28	22	0	13	28	0	15
2	1	41	50	37	43	36	46	50	52	27	100	48
	2	16	17	6	43	21	15	33	15	27	0	19
	3	31	5	25	14	28	24	17	11	27	0	18
	4	3	17	16	0	0	0	0	11	6	0	5
	5	9	11	19	0	15	15	0	11	13	0	9
3	1	41	45	30	61	33	15	32	43	33	56	39
	2	8	5	12	4	27	0	38	10	11	22	14
	3	32	20	23	26	13	38	12	14	11	11	20
	4	5	15	12	9	0	7	12	14	28	11	11
	5	14	15	23	0	27	38	6	19	17	0	16

Примечание. Ср. — среднее значение каждого класса встречаемости по всем вариантам опыта.

медленное восстановление видового состава по сравнению с другими вариантами опыта.

Во второй год мониторинга колеи при восьми и десяти проходах форвардера показали высокие значения индекса Жаккара — в большинстве случаев выше 50. По нашим наблюдениям, видов максимально распространялись по стенкам колеи, заходя на учетные площади с прилегающих вариантов опыта. Данные виды относятся к длиннокорневищным, дерновинным корнеотпрысковым биоморфам, имеющим вторичные типы стратегии (по системе Раменского — Грайма), например, *Equisetum sylvaticum*, *Avenella flexuosa*, *Calamagrostis epigeios*, *Luzula pilosa*, *Chamaenerion angustifolium*. Большинство из них отличается вегетативной подвижностью и широкой экологической валентностью.

Динамика флористического сходства в пределах одного варианта опыта имеет схожую тенденцию по годам наблюдений во всех вариантах. На 2-й год мониторинга индекс Жаккара повысился, на 3-й — его значения стали наиболее низкими, что указало на внедрение новых видов растений в пределах освободившихся и вновь появившихся экологических ниш.

Расчет встречаемости видов показал, что во всех вариантах опыта встречаются все классы встречаемости — 1–5 (табл. 3).

Практически все три года наблюдений преобладает 1-й класс встречаемости с тенденцией к понижению к третьему году. Наблюдается повышение разнообразия растений с разными классами встречаемости к третьему году мониторинга. Такой ход является классическим для начальных этапов вторичной сукцессии.

Высокий класс встречаемости, а также индекс фитоценотической значимости на протяжении трех лет наблюдений фиксировался для основных доминантов зеленомошного типа леса — *Vaccinium myrtillus* и *Vaccinium vitis-idaea*. Класс встречаемости возрастал в первую очередь у растений, имеющих высокую вегетативную подвижность — *Chamaenerion angustifolium*, *Equisetum sylvaticum*, *Trientalis europaea*, *Linnaea borealis*. Такие виды первыми заселяли незанятые пространства, увеличивая свое проективное покрытие.

Таким образом, наблюдается типичная тенденция вторичной сукцессионной динамики в первые годы после рубки. Внедрение новых видов, которые в первые один–два года имеют низкую встречаемость (классы 1–2-й), повышение встречаемости видов (переход на 2–4-й классы) и новую волну внедрения видов. Фоновые виды на 2–3-й год повышают класс встречаемости или вновь появляются на территории из почвенного банка семян и с прилегающих участков леса (например, *Oxalis acetosella*, *Solidago virgaurea*, *Melampyrum pratense*). Доминанты коренного типа леса (*Vaccinium myrtillus* и *Vaccinium vitis-idaea*) сохраняют высокий класс встречаемости, а на 3-й год наблюдений он повышается до 5-го класса практически во всех вариантах опыта.

Вслед за повышением встречаемости возрастает проективное покрытие вида, что отражается на индексе фитоценотической значимости (рис. 1).

В 1-й год наблюдений класс ИФЗ составлял не выше трех, за исключением пасеки. Разнообразие классов ИФЗ росло вслед за количеством видов в пределах варианта опыта. 5-го класса ИФЗ достиг

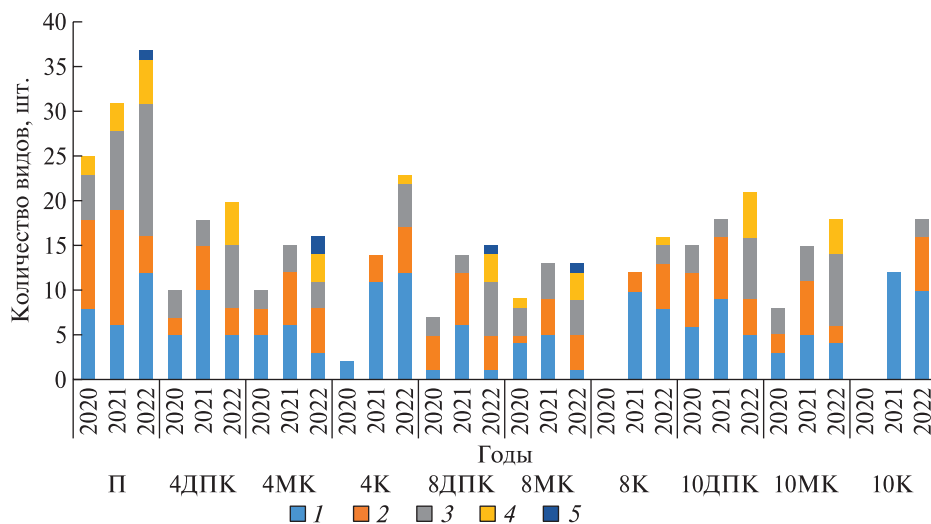


Рис. 1. Динамика индекса фитоценотической значимости по годам в вариантах опыта: 1, 2, 3, 4, 5 — класс индекса фитоценотической значимости
Fig. 1. Dynamics Index of phytocenotic significance by years in the variants of experience

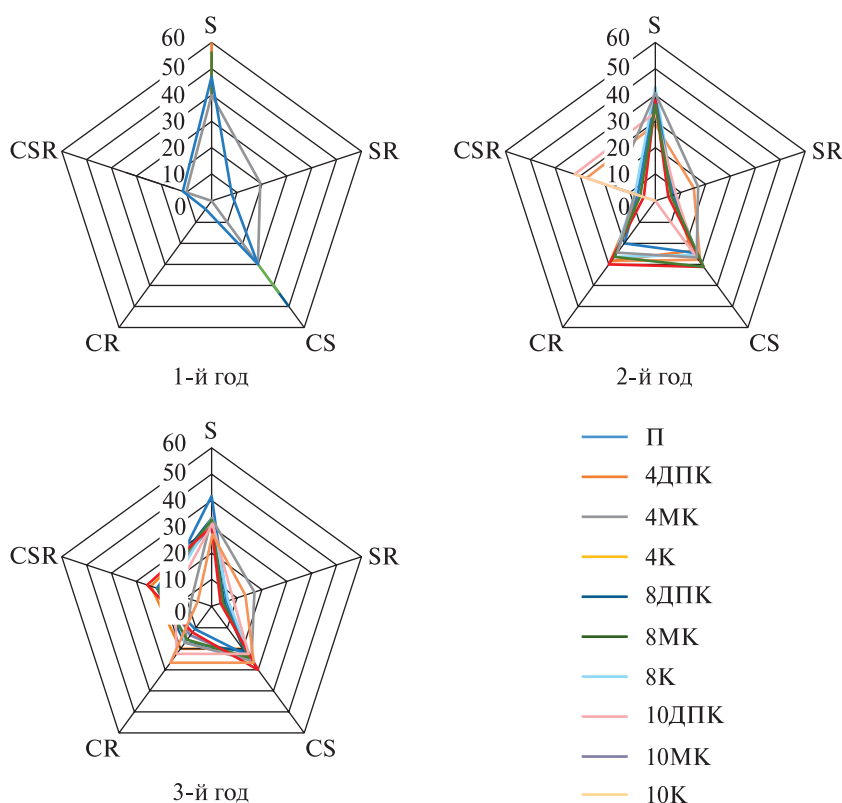


Рис. 2. Процентное соотношение видов по типам экологических стратегий (по Раменскому — Грайму)
Fig. 2. Percentage of species by types of life strategies (according to Ramensky — Grime)

доминант зеленомошного типа леса *Vaccinium myrtillus* и *Chamaenerion angustifolium*. На 3-й год наблюдений 4-й класс ИФЗ практически во всех вариантах опыта достигают следующие виды — *Chamaenerion angustifolium*, *Vaccinium vitis-idaea*, *Deschampsia cespitosa*, *Equisetum sylvaticum*.

В составе травяно-кустарничкового яруса выделены растения со следующими типами экологических стратегий:
S — пациенты;
SR — с сочетанием свойств пациентности и эксплерентности;

Динамика ценоотических групп по Л.Б. Заугольной на учетных площадках

Dynamics of cenotic groups according to L.B. Zauginovain the study areas

Год учета	Соотношение ценоотических групп, %	Ценоотическая группа	Особенности динамики по видам
2020	43Br_m27Br_k11H 11Nm4Ogl4Wt	Br_k	<i>Orthilia secunda</i> и <i>Pyrolarotundi folia</i> , р. <i>Lycopodium</i> — преимущественно только в пределах пазек. Остальные виды данной ценоотической группы встречаются во всех вариантах
		Br_m	<i>Goodyera repens</i> — только в 1-й год мониторинга на пазеке. Остальные виды данной ценоотической группы встречаются во всех вариантах
		Ogl	<i>Carexglo bularis</i> — во всех вариантах опыта
2021	30Br_m22Br_k18Wt15H 6Pn6Nt3Ogl	H	Группа характерна преимущественно для пазеки, сохраняется на протяжении трех лет. <i>Cirsium heterophyllum</i> , <i>Dryopteris carthusiana</i>
		Nt	<i>Galium palustre</i> и <i>Ranunculus repens</i> — на сильно увлажненном участке пазеки, в обводненной колее
		Nm	<i>Platanthera bifolia</i> и <i>Vicia sylvatica</i> — в 1-й год на пазеке. <i>Milium effusum</i> — на 3-й год в межколейном пространстве
2022	26Br_m23Wt18Br_k15H 7Pn5Nt2Md2Nm2Ogl	Md	<i>Deschampsia cespitosa</i> — на 3-й год мониторинга, во всех вариантах
		Pn	<i>Avenella flexuosa</i> и р. <i>Hieracium</i> — на 2–3 года во всех вариантах.
		Wt	<i>Ranunculus subborealis</i> — в 1-й год на пазеке, в микропонижениях. Остальные виды данной ценоотической группы появляются на 2–3 года в обводненных колеех, межколейном пространстве и сильно увлажненной пазеки

CR — с сочетанием свойств виолентности и эксплерентности;

CS — с сочетанием свойств виолентности и пациентности;

CSR — с сочетанием свойств первичных типов стратегий (рис. 2).

Исследованные виды растений представлены преимущественно пациентами ($S = 20$), второе место занимают виды с сочетанием виолентных и пациентных свойств ($CS = 11$), третье — виды с сочетанием трех первичных жизненных стратегий ($CSR = 8$). В остальные три типа стратегий входят по 2–3 вида. В преобладающую группу входят преимущественно фоновые растения темнохвойного зеленомошного леса. Например, такие виды, как *Linnaea borealis*, *Lycopodium annotinum*, *Maianthemum bifolium*. К стратегии CS относятся наиболее широко распространенные виды в бореальных лесах, часто выступающие доминантами — *Vaccinium myrtillus*, *Vaccinium vitis-idaea*. К видам, сочетающим три типа стратегий (CSR), относятся *Avenella flexuosa*, *Equisetum sylvaticum*, *Calamagrostis epigeios*, *Carex globularis*, *Ranunculus repens*. Вегетативно подвижные неприхотливые виды быстро распространяются по нарушенным территориям.

Схожий тип лесорастительных условий, который обуславливает близкий флористический состав, во всех вариантах опыта показывает схожее распределение по типам экологических стратегий (см. рис. 2). На 2-й год наблюдений происходит

снижение доли растений с типами стратегий S и CS. В эти группы входят наиболее уязвимые виды представителей семейства *Orchidaceae*. Во всех вариантах опыта возрастает доля стратегий CR и CSR. На год раньше это проявилось в пределах вариантов опыта десятью проходами форвардера.

Преобладание пациентов с последующим возрастанием роли вторичных стратегии среди растений разных вариантов опыта свидетельствует о дестабилизированной среде произрастания, характерной для начала вторичной сукцессии.

Анализ соотношения ценоотических групп, по Л.Б. Заугольной, показал схожие тенденции за три года наблюдений (табл. 4). Количество ценоотических групп возрастало с каждым годом. Преобладают фоновые группы зеленомошных типов леса (Br_m — бореальное мелкотравье и Br_k — вечнозеленые кустарнички и травы). На 2–3-й год наблюдений в доминирующие группы вошла водно-болотная группа растений, заселяющих обводненные колее и переувлажненную часть пазеки.

Травяно-кустарничковый ярус включает в себя большое количество видов из разных ценоотических групп, что в целом характерно для начальных этапов сукцессии [31, 32]. Колейность на волоках сформировала новые экологические ниши для видов, произрастающих на переувлажненных участках. Открытые участки дали возможность появиться луговому и борovому группам. Резкая смена микроклимата в свою очередь повлекла

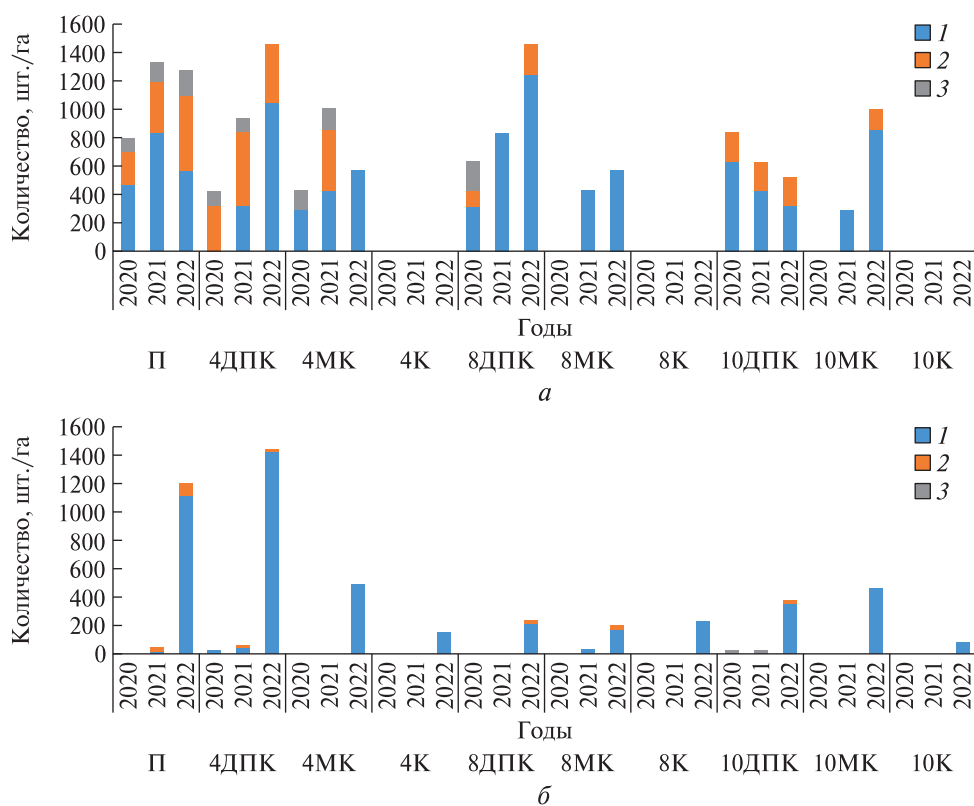


Рис. 3. Динамика подроста различных категорий крупности на участках исследования, шт./га:
 а — *Picea abies*; б — *Betula pendula*; 1 — мелкий; 2 — средний; 3 — крупный
Fig. 3. Dynamics of undergrowth of different size categories in the study areas, pcs/ha: а — *Picea abies*;
 б — *Betula pendula*; 1 — small; 2 — medium; 3 — large

исчезновение наиболее чувствительных видов из неморальной ценотической группы, в первую очередь представителей семейства *Orchidaceae*.

В 1-й год исследований всходы древесных пород отсутствовали на всех учетных площадках (табл. 5).

В 1-й год учета подрост во всех вариантах опыта отсутствовал. Спустя год после рубки практически во всех вариантах опыта отмечается появление всходов ели и березы, причем количество всходов березы в 15 раз больше. Больше всего всходов березы отмечено при четырех проходах форвардера при наименьших повреждениях, с неглубокими колеями и перемешанным слоем почвы. При восьми проходах форвардера наблюдается некоторое снижение численности всходов березы, при большем количестве всходов в колеях, по сравнению с межколейным пространством и в вариантах опыта до и после колеи. При десяти проходах форвардера количество всходов ели и березы также снижается, при этом количество всходов в колеях меньше 2–11 раз по сравнению с межколейным пространством и вариантах опыта до и после колеи.

На 2-й год после рубки (3-й год учета) также наблюдается обильное появление всходов ели

Т а б л и ц а 5

Динамика всходов на учетных площадках, шт./га

Dynamics of young seed lings in the study areas, pcs./ha

Вариант опыта	Год учета					
	2021			2022		
	Е	Б	С	Е	Б	С
П	167	1633	0	33	100	0
4ДПК	313	8750	0	0	15313	417
4МК	417	6583	0	0	6833	83
4К	0	5143	0	0	8429	143
8ДПК	313	1667	0	0	3333	0
8МК	417	4583	0	0	10750	583
8К	143	143	0	0	4857	143
10ДПК	313	2188	0	104	3854	104
10МК	167	583	0	83	2833	417
10К	286	6714	0	0	3857	0

Примечание. Е — ель *Picea abies*; Б — береза *Betula pendula*; С — сосна *Pinus sylvestris*.

и сосны практически во всех вариантах опыта. Появление всходов ели отмечено только в пасаках и в вариантах с десятью проходами форвардера. Аналогичная тенденция в 2022 г. прослеживается, как и в 2021 г., со снижением среднего количества

Т а б л и ц а 6

Динамика подлеска различных категорий крупности на учетных площадках, шт./га

Dynamics of underscrub of different size categories in the study areas, pcs./ha

Год учета	Вариант опыта	<i>Sorbus aucuparia</i>				<i>Rosa acicularis</i>				<i>Juniperus communis</i>				<i>Salix caprea</i>				Итого
		м	ср	к	все-го	м	ср	к	все-го	м	ср	к	все-го	м	ср	к	все-го	
2020	П	167	100	0	267	833	900	0	1733	33	33	33	100	33	0	0	33	2134
	4ДПК	208	208	313	729	729	0	0	729	0	0	0	0	0	0	0	0	1458
	4МК	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4К	0	0	286	286	286	0	0	286	0	0	0	0	0	0	0	0	571
	8ДПК	0	0	0	0	0	208	0	208	0	0	0	0	0	0	0	0	208
	8МК	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	8К	0	143	0	143	0	0	0	0	0	143	0	143	0	0	0	0	286
	10ДПК	208	208	0	417	0	104	0	104	0	0	0	0	0	0	0	0	521
	10МК	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10К	1429	286	0	1714	0	143	0	143	0	0	0	0	0	0	0	0	1857	
2021	П	200	133	0	333	2267	800	0	3067	33	33	33	100	0	100	0	100	3600
	4ДПК	1146	313	104	1563	4792	0	0	4792	0	0	104	104	0	0	0	0	6458
	4МК	83	0	0	83	4833	0	0	4833	0	0	0	0	0	0	0	0	4917
	4К	714	0	286	1000	5429	143	0	5571	0	0	0	0	0	0	0	0	6571
	8ДПК	729	0	0	729	208	417	0	625	0	0	0	0	0	0	0	0	1354
	8МК	0	0	0	0	333	0	0	333	0	0	0	0	0	167	0	167	500
	8К	143	143	0	286	0	0	0	0	0	143	0	143	0	0	0	0	429
	10ДПК	2500	0	0	2500	1979	208	0	2188	0	0	0	0	0	0	0	0	4688
	10МК	0	0	0	0	83	0	0	83	0	0	0	0	0	0	0	0	83
10К	143	0	0	143	143	143	0	286	0	0	0	0	0	0	0	0	429	
2022	П	167	367	0	533	1333	2933	67	4333	33	33	0	67	100	67	0	167	5100
	4ДПК	1250	625	0	1875	6354	1875	0	8229	0	104	0	104	0	0	0	0	10208
	4МК	0	0	0	0	1333	83	0	1417	0	0	0	0	83	0	0	83	1500
	4К	286	429	286	1000	2286	714	0	3000	0	0	0	0	0	0	0	0	4000
	8ДПК	938	208	0	1146	104	200	104	408	0	0	0	0	0	0	0	0	1554
	8МК	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	167	0	167	167
	8К	286	286	0	571	0	0	0	0	0	143	0	143	143	0	0	143	857
	10ДПК	2708	1563	0	4271	3438	313	0	3750	0	0	0	0	208	0	0	208	8229
	10МК	0	0	0	0	150	33	0	183	0	0	0	0	167	0	0	167	350
10К	286	0	0	286	714	429	0	1143	0	0	0	0	0	0	0	0	1429	

Примечание. Подлесок: м — мелкий; ср — средний; к — крупный.

всходов березы и сосны в вариантах опыта с большим количеством проездов форвардера, что, скорее всего, связано с неблагоприятными физическими свойствами почвы и застойными явлениями поверхностной влаги [8].

В пасеке после рубки сохранилось 800 шт./га жизнеспособного елового подроста, который наполовину был представлен мелкой категорией крупности (рис. 3). При четырех проходах форвардера сохранился еловый подрост различных категорий крупности в вариантах 4ДПК и 4МК. При восьми и десяти проходах форвардера сохранился мелкий и средний еловый подрост в вариантах 8ДПК и 10ДПК. Березовой подрост был отмечен только в вариантах опыта до и после колеи при четырех проходах форвардера.

Через год после рубки наблюдается пополнение подроста всходами и изменение доли участия

категорий крупности подрост ели и березы практически на всех учетных площадках. Часть подроста, которая была представлена сомнительными и неблагонадежными экземплярами перешла в стадию сухостоя. В колеях при четырех, восьми и десяти проходах форвардера подрост полностью отсутствовал, несмотря на то что на данных участках были отмечены всходы как ели, так и березы (см. табл. 5). В пасеках густота подрост увеличилась до 1567 шт./га за счет ели и березы.

Более динамичные процессы отмечены на 3-й год мониторинга, когда большая часть отмеченных всходов и самосева перешли в стадию подроста. В пасеках густота подрост увеличилась до 7233 шт./га, который был представлен на 80 % березовым мелким подростом, что свидетельствует о классической смене пород [33]. Только в варианте 4ДПК отмечено больше подроста, чем

в пасаках. В колеях отмечается появление мелкого подростка березы, но подрост ели отсутствует, что, скорее всего, связано с гибелью всходов в весенний и осенний периоды. В колеях при четырех проходах форвардера количество подростка в 10 раз меньше, чем в пасаках. При восьми проходах форвардера количество подростка в колеях в 7 раз меньше, чем в пасаках. При десяти проходах форвардера количество подростка в колеях меньше в 17 раз по сравнению с пасаками.

В пасаках после рубки сохранилось 2134 шт./га жизнеспособного подлеска, который был представлен *Sorbus aucuparia* на 13 %, *Rosa acicularis* — 81 %, *Juniperus communis* — 5 % и *Salix caprea* — 1 % (табл. 6). В вариантах до и после колей, а также в межколейном пространстве сохранилось от 286 до 1857 шт./га подлеска, представленного в основном шиповником и рябиной. В колеях подлесок отсутствовал.

Через год после рубки наблюдается пополнение количества подлеска и изменение категорий крупности. В пасаках густота подлеска увеличилась до 3600 шт./га в основном за счет шиповника, доля которого составила 85 %. При четырех проходах форвардера во всех вариантах опыта подлеска было больше в 1,4–1,8 раза, чем в пасаках. В колеях появился мелкий подлесок, состоящий преимущественно из шиповника. При восьми проходах форвардера количество подлеска в вариантах опыта заметно меньше — в 2,7–8,4 раза по сравнению с пасаками. В колеях появились только шиповник и ива. При десяти проходах форвардера в варианте 10ДПК количество подлеска больше в 1,3 раза по сравнению с пасаками. В остальных вариантах количество подлеска в 8,4–43 раза меньше, чем в пасаках. В колеях присутствовал только шиповник.

На 2-й год после рубки в пасаках насчитывается 5100 шт./га подлеска, который был представлен следующим составом: 85Шип11Ряб3Ив1Мож. При четырех проходах форвардера в варианте 4ДПК наблюдается увеличение подлеска до 10 208 шт./га за счет шиповника и рябины. В колеях наблюдается снижение общей численности подлеска в 3,2 раза по сравнению с предыдущим годом. В межколейных пространствах также отмечено снижения численности.

В 2022 г. при восьми проходах форвардера отмечено небольшое увеличение подлеска в вариантах 8ДПК и 8МК по сравнению с 2021 г. В колеях наблюдается снижение численности подлеска в 3 раза и сохраняется только ива.

При десяти проходах форвардера также отмечено увеличение количества подлеска на всех учетных площадках за счет шиповника и рябины. В колеях подлеска в 14,6 меньше по сравнению с пасаками.

Выводы

В северотаежных лесах в условиях черничного типа леса на 2-й год после рубки отмечаются динамичные процессы восстановления живого напочвенного покрова и древесно-кустарничковой растительности на волоках, не покрытых порубочными остатками. Анализ динамики видового состава указывает на классические тенденции начальных этапов сукцессии в лесном фитоценозе.

Волока с минимальным числом проходов груженого форвардера оказываются более благоприятными для восстановления древесно-кустарничковой растительности. На 3-й год мониторинга густота подростка в колеях, где наблюдаются неблагоприятные физические свойства почвы и застойные явления поверхностной влаги, ниже в 9,6–17,3 раза по сравнению с пасеккой. Густота подлеска в колеях также ниже 3,4–14,6 раза по сравнению с пасеккой.

Таким образом, при проведении лесозаготовительных работ необходимо применять эффективные примеры из практики для ограничения уплотнения и колеобразования, которые влияют на последующие лесовозобновление и продуктивность будущих лесов.

Результаты исследования вносят вклад в понимание пространственно-временных закономерностей формирования, функционирования и прогноза развития послерубочных лесных экосистем.


Исследование выполнено за счет гранта Российской научной фонды № 23-76-01014, <https://rscf.ru/project/23-76-01014/>

Список литературы

- [1] Wang S. One hundred faces of sustainable forest management // *Forest Policy Econ.*, 2004, v. 6, no. 3–4, pp. 205–213.
- [2] Zimmerman B., Kormos C. Prospects for sustainable logging in tropical forests // *Bioscience*, 2012, v. 62, no. 5, pp. 479–487.
- [3] d'Oliveira M.V.N., Reutebuch S.E., McGaughey R.J., Andersen H. Estimating forest biomass and identifying low-intensity logging areas using airborne scanning lidar in Antimary State Forest, Acre State, Western Brazilian Amazon // *Remote Sens. Environ.*, 2012, v. 124, pp. 479–491.
- [4] Marchi E., Chung W., Visser R., Abbas D., Nordfjell T., Mederski P.S., McEwan A., Brinkh M., Laschi A. Sustainable Forest Operations (SFO): A new paradigm in a changing world and climate // *Science of the Total Environment*, 2018, v. 634, pp. 1385–1397.
- [5] Fredericksen T.S., Pariona, W. Effect of skidder disturbance on commercial tree regeneration in logging gaps in a Bolivian tropical forest // *For. Ecol. Manage.*, 2002, v. 171, pp. 223–230.
- [6] Gauthier S., Bernier P., Kuuluvainen T., Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G. Boreal forest health and global change // *Science*, 2015, v. 349, no. 6259, pp. 819–821.

- [7] Wei X., Giles-Hansen K., Spencer S. A., Ge X., Onuchin A., Li Q., Burenina T., Ilintsev A., Hou Y. Forest harvesting and hydrology in boreal forests: Under an increased and cumulative disturbance context // *For. Ecol. Manage.*, 2022, v. 522, id. 120468.
- [8] Ильинцев А.С., Наквасина Е.Н. Образование колеиности при проходе лесозаготовительной техники в ельниках на двучленных породах // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*, 2021. № 237. С. 168–182.
- [9] Han H.-S., Page-Dumroese D.S., Han S.-K., Tirocke J. Effect of slash, machine passes, and soil moisture on penetration resistance in a cut-to-length harvesting // *International J. of Forest Engineering*, 2006, v. 17, pp. 11–24.
- [10] Gerasimov Yu., Katarov V. Effect of Bogie Track and Slash Reinforcement on Sinkage and Soil Compaction in Soft Terrains // *Croatian J. of Forest Engineering*, 2010, v. 31, no. 1, pp. 35–45.
- [11] Катаров В.К., Сюнев В.С., Ратькова Е.И., Герасимов Ю.Ю. Влияние форвардеров на лесные почво-грунты // *Resources and Technology*, 2012. Т. 9. № 2. С. 73–81.
- [12] DeArmond D., Ferraz J.B.S., Higuchi N. Natural recovery of skid trails: a review // *Can. J. For. Res.*, 2021, v. 51, pp. 948–96.
- [13] Putz F.E., Blate G.M., Redford K.H., Fimbel R., Robinson J.G. Biodiversity conservation in the context of tropical forest management // *Conserv. Biol.*, 2001, v. 15, pp. 7–20.
- [14] Karsten R.J., Meilby H., Larsen J. Regeneration and management of lesser known timber species in the Peruvian Amazon following disturbance by logging // *For. Ecol. Manage.*, 2014, v. 327, pp. 76–85.
- [15] Jourgholami M., Majnounian B., Abari M.E. Effects of treelength timber skidding on soil compaction in the skid trail in Hyrcanian forests // *For. Syst.*, 2014, v. 23, no. 2, pp. 288–293.
- [16] Arevalo B., Valladarez J., Muschamp S., Kay E., Finkral A., Roopsind A., Putz F.E. Effects of reduced-impact selective logging on palm regeneration in Belize // *For. Ecol. Manage.*, 2016, v. 369, pp. 155–160.
- [17] de Carvalho, A.L., d'Oliveira, M.V.N., Putz, F.E., de Oliveira, L.C. Natural regeneration of trees in selectively logged forest in western Amazonia // *For. Ecol. Manage.*, 2017, v. 392, pp. 36–44.
- [18] Aust W.M., Bolding M.C., Barrett S.M. Silviculture in forested wetlands: summary of current forest operations, potential effects, and long-term experiments // *Wetlands*, 2020, v. 40, pp. 21–36.
- [19] Об утверждении видов лесосечных работ, порядка и последовательности их выполнения, формы технологической карты лесосечных работ, формы акта заключительного осмотра лесосеки и порядка заключительного осмотра лесосеки: утверждены Приказом Минприроды России от 17.01.2022 № 23. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_409531/ (дата обращения 01.10.2022).
- [20] Тиходеева М.Ю., Лебедева В.Х. Практическая геоботаника (анализ состава растительных сообществ). СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 2015. 166 с.
- [21] Флора северо-востока европейской части СССР. В 4 т. Л.: Наука. 1974. Т. I. 276 с.; 1976. Т. II. 316 с.; Т. III. 296 с.; 1977. Т. IV. 312 с.
- [22] Игнатов М.С., Игнатова Е.А. Флора мхов средней части Европейской России. В 2 т. М.: КМК. 2003. Т. I. 608 с.; 2004. Т. II. 960 с.
- [23] Черепанов С.К. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). СПб.: Мир и семья, 1995. 992 с.
- [24] Плантариум. Растения и лишайники России и сопредельных стран: открытый онлайн атлас и определитель растений 2007–2022. URL: <https://www.plantarium.ru/> (дата обращения: 10.09.2022).
- [25] Баканов А.И. Количественная оценка доминирования в экологических сообществах. Борок: Изд-во ВИНТИ, 1987. 63 с.
- [26] Парина Т.А., Волков А.Г. Методы изучения луговых экосистем: учебное пособие. Архангельск: КИРА, 2017. 141 с.
- [27] Раменский Л.Г. Проблемы и методы изучения растительного покрова. Л.: Наука, 1971. 333 с.
- [28] Grime J.P., Rinkon E.R., Wickerson B.E. Bryophytes and plant strategy theory // *Botanical J. of the Linnean Society*, 1990, v. 104, pp. 175–186.
- [29] Заугольнова Л.Б., Смирнова О.В. Современные представления о структуре и динамике растительного покрова как основа для разработки методов сохранения видового разнообразия // Оценка и сохранение биоразнообразия лесного покрова в заповедниках Европейской России. М.: Научный мир, 2000. С. 9–14.
- [30] Шмидт В. М. Флора Архангельской области. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 2005. 346 с.
- [31] Roberts M.R., Zhu L.X. Early response of the herbaceous layer to harvesting in a mixed coniferous-deciduous forest in New Brunswick, Canada // *For. Ecol. Manage.*, 2002, v. 155, pp. 17–31.
- [32] Ильинцев А.С., Амосова И.Б., Третьяков С.В. Эколого-биологический анализ влияния различных видов рубок на структуру травяно-кустарничкового яруса черничных типов леса // *Лесотехнический журнал*, 2019. Т. 9. № 1(33). С. 31–43.
- [33] Мелехов И.С. Лесоводство. М.: МГУЛ, 2003. 320 с.

Сведения об авторах

Ильинцев Алексей Сергеевич  — канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр. ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства» (СевНИИЛХ), доцент кафедры лесоводства и лесостроительства, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), a.ilintsev@narfu.ru

Амосова Ирина Борисовна — канд. с.-х. наук, доцент кафедры биологии, экологии и биотехнологии ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), i.amosova@narfu.ru

Поступила в редакцию 08.08.2023.

Одобрено после рецензирования 14.09.2023.

Принята к публикации 23.08.2023.

FOREST PROGRESSIVE SUCCESSION EARLY STAGES IN BLUEBERRY SPRUCE FELLING SITE IN NORTHERN TAIGA FORESTS OF EUROPEAN PART OF RUSSIA

A.S. Ilintsev^{1, 2✉}, I.B. Amosova²

¹Northern Research Institute of Forestry, 13, Nikitova st., 163062, Arkhangelsk, Russia

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

a.ilintsev@narfu.ru

The article presents the materials of the three-year vegetation development dynamics at the early stages of progressive succession. We have shown the dynamics of young seedlings, undergrowth and forest understorey, as well as grass-shrub and moss stories at the trial plots. The total projective coverage of the stories increases. We noted the introduction of new species, which most clearly appears in the ruts, between the ruts and within the waterlogged cutting strip. Phytocenotic significance increases in the main common species of this forest type, but along with them, the species combining the violentic and explorer types of strategies. Typical boreal groups predominate among cenotic groups, with an increase in the proportion of the wetland group in the third year of monitoring. We found that for 1–2 years after logging, there is an abundant appearance of birch young seedlings, which are 15–30 times more than spruce and pine young seedlings. In the 3rd year, the density of undergrowth increased from 800 to 7233 pcs./ha in cutting strips due to small birch undergrowth. At this stage, most of the noted young seedlings have passed into the undergrowth stage. In ruts with 4 forwarder passes, the amount of undergrowth is 10 times less than in cutting strips, with 8 forwarder passes — 7 times less, with 10 forwarder passes — 17 times less. A similar dynamic is noted in the regeneration of understorey. Following the principles of sustainable forest management, it is necessary to limit and minimize the negative environmental consequences of repeated passage of logging machinery. The results of this study contribute to the understanding of the spatial and temporal patterns of formation, functioning and prognosis of the development of post-harvest forest ecosystems.

Keywords: final harvesting, forwarder, number of passages, living ground cover, young seedlings, undergrowth, understorey

Suggested citation: Ilintsev A.S., Amosova I.B. *Nachal'nye etapy lesovosstanovitel'noy suksessii na vyrubke el'nika chernichnika v severotaezhnykh lesakh evropeyskoy chasti Rossii* [Forest progressive succession early stages in blueberry spruce felling site in Northern Taiga forests of European part of Russia]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 6, pp. 5–17. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-5-17

References

- [1] Wang S. One hundred faces of sustainable forest management. *Forest Policy Econ.*, 2004, v. 6, no. 3–4, pp. 205–213.
- [2] Zimmerman B., Kormos C. Prospects for sustainable logging in tropical forests. *Bioscience*, 2012, v. 62, no. 5, pp. 479–487.
- [3] d'Oliveira M.V.N., Reutebuch S.E., McGaughey R.J., Andersen H. Estimating forest biomass and identifying low-intensity logging areas using airborne scanning lidar in Antimary State Forest, Acre State, Western Brazilian Amazon. *Remote Sens. Environ.*, 2012, v. 124, pp. 479–491.
- [4] Marchi E., Chung W., Visser R., Abbas D., Nordfjell T., Mederski P.S., McEwan A., Brinkh M., Laschi A. Sustainable Forest Operations (SFO): A new paradigm in a changing world and climate. *Science of the Total Environment*, 2018, v. 634, pp. 1385–1397.
- [5] Fredericksen T.S., Pariona, W. Effect of skidder disturbance on commercial tree regeneration in logging gaps in a Bolivian tropical forest. *For. Ecol. Manage.*, 2002, v. 171, pp. 223–230.
- [6] Gauthier S., Bernier P., Kuuluvainen T., Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G. Boreal forest health and global change. *Science*, 2015, v. 349, no. 6259, pp. 819–821.
- [7] Wei X., Giles-Hansen K., Spencer S.A., Ge X., Onuchin A., Li Q., Burenina T., Ilintsev A., Hou Y. Forest harvesting and hydrology in boreal forests: Under an increased and cumulative disturbance context. *For. Ecol. Manage.*, 2022, v. 522, id. 120468.
- [8] Ilintsev A.S., Nakvasina E.N. *Obrazovanie koleynosti pri prokhode lesozagotovitel'noy tekhniki v el'nikakh na dvuchlennykh porodakh* [Rut formation after the passage of logging machinery in spruce forests on binomial soils]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy], 2021, no. 237, pp. 168–182.
- [9] Han H.-S., Page-Dumroese D.S., Han S.-K., Tirocke J. Effect of slash, machine passes, and soil moisture on penetration resistance in a cut-to-length harvesting. *International J. of Forest Engineering*, 2006, v. 17, pp. 11–24.
- [10] Gerasimov Yu., Katarov V. Effect of Bogie Track and Slash Reinforcement on Sinkage and Soil Compaction in Soft Terrains. *Croatian J. of Forest Engineering*, 2010, v. 31, no. 1, pp. 35–45.
- [11] Katarov V.K., Syunev V.S., Rat'kova E.I., Gerasimov U.U. *Vliyaniye forvarderov na lesnyye pochvo-grunty* [Impact of forwarders on forest soils], *Resources and Technology*, 2012, no. 9 (2), pp. 73–81.
- [12] DeArmond D., Ferraz J.B.S., Higuchi N. Natural recovery of skid trails: a review. *Can. J. For. Res.*, 2021, v. 51, pp. 948–96.
- [13] Putz F.E., Blate G.M., Redford K.H., Fimbel R., Robinson J.G. Biodiversity conservation in the context of tropical forest management. *Conserv. Biol.*, 2001, v. 15, pp. 7–20.
- [14] Karsten R.J., Meilby H., Larsen J. Regeneration and management of lesser known timber species in the Peruvian Amazon following disturbance by logging. *For. Ecol. Manage.*, 2014, v. 327, pp. 76–85.
- [15] Jourgholami M., Majnounian B., Abari M.E. Effects of treelength timber skidding on soil compaction in the skid trail in Hyrcanian forests. *For. Syst.*, 2014, v. 23, no. 2, pp. 288–293.

- [16] Arevalo B., Valladarez J., Muschamp S., Kay E., Finkral A., Roopsind A., Putz F.E. Effects of reduced-impact selective logging on palm regeneration in Belize. *For. Ecol. Manage.*, 2016, v. 369, pp. 155–160.
- [17] de Carvalho, A.L., d'Oliveira, M.V.N., Putz, F.E., de Oliveira, L.C. Natural regeneration of trees in selectively logged forest in western Amazonia. *For. Ecol. Manage.*, 2017, v. 392, pp. 36–44.
- [18] Aust W.M., Bolding M.C., Barrett S.M. Silviculture in forested wetlands: summary of current forest operations, potential effects, and long-term experiments. *Wetlands*, 2020, v. 40, pp. 21–36.
- [19] *Ob utverzhdenii vidov lesosechnykh rabot, poryadka i posledovatel'nosti ikh vypolneniya, formy tekhnologicheskoy karty lesosechnykh rabot, formy akta zaklyuchitel'nogo osmotra lesoseki i poryadka zaklyuchitel'nogo osmotra lesoseki: utverzhdeny Prikazom Minprirody Rossii ot 17.01.2022 № 23* [On the approval of the Types of logging operations, the order and sequence of their execution, the form of the technological map of logging operations, the form of the act of final inspection of the cutting area and the order of final inspection of the cutting area: Approved by the Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation dated January 17, 2022 No. 23]. Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_409531/ (accessed 01.10.2022).
- [20] Tichodeeva M.Yu., Lebedeva V.H. *Prakticheskaya geobotanika (analiz sostava rastitel'nykh soobshchestv)* [Practical geobotany (analysis of the composition of plant communities)]. St. Petersburg: St. Petersburg University, 2015, 166 p.
- [21] *Flora severo-vostoka evropeyskoy chasti SSSR: v 4-kh tomakh* [Flora of the North-East of the European part of the USSR: in 4 volumes]. Ed. A.I. Tolmacheva. Leningrad: Nauka, v. I. 1974. 276 p.; v. II. 1976. 316 p.; v. III. 1976. 296 p.; v. IV. 1977. 312 p.
- [22] Ignatov M.S., Ignatova E.A. *Flora mkhov sredney chasti Evropeyskoy Rossii. V 2-kh tomakh* [Flora of mosses of the middle part of European Russia. In 2 volumes]. Moscow: KMK, 2003, v. I, 608 p.; 2004, v. II, 960 p.
- [23] Cherepanov S.K. *Sosudistye rasteniya Rossii i soprodel'nykh gosudarstv (v predelakh byvshego SSSR)* [Vascular plants of Russia and neighboring countries (within the former USSR)]. St. Petersburg: Peace and family, 1995, 992 p.
- [24] Plantarium. Plants and lichens of Russia and neighboring countries: open online galleries and plant identification guide. 2007–2022. Available at: <https://www.plantarium.ru/> (accessed 10.09.2022).
- [25] Bakanov A.I. *Kolichestvennaya otsenka dominirovaniya v ekologicheskikh soobshchestvakh* [Quantitative assessment of dominance in ecological communities]. Borok: VINITI, 1987, 63p.
- [26] Parinova T.A., Volkov A.G. *Metody izucheniya lugovykh ekosistem* [Methods of studying meadow ecosystems]. Arkhangelsk: KIRA, 2017, 141p.
- [27] Ramenskiy L.G. *Problemy i metody izucheniya rastitel'nogo pokrova* [Problems and methods of studying vegetation cover]. Leningrad: Science, Leningrad Branch, 1971, 333p.
- [28] Grime J.P., Rinkon E.R., Wickerson B.E. Bryophytes and plant strategy theory. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 1990, v. 104, pp. 175–186.
- [29] Zaugol'nova L.B., Smirnova O.V. *Sovremennyye predstavleniya o strukture i dinamike rastitel'nogo pokrova kak osnova dlya razrabotki metodov sokhraneniya vidovogo raznoobraziya* [Modern ideas about the structure and dynamics of vegetation cover as a basis for the development of methods of conservation of species diversity]. *Otsenka i sokhraneniye bioraznoobraziya lesnogo pokrova v zapovednikakh Evropeyskoy Rossii* [Assessment and conservation of forest biodiversity in European Russia reserves]. Moscow: Scientific world Publ., 2000. pp. 9–14.
- [30] Shmidt V.M. *Flora Arkhangel'skoy oblasti* [Flora of the Arkhangelsk region]. St. Petersburg: St. Petersburg University, 2005, 346 p.
- [31] Roberts M.R., Zhu L.X. Early response of the herba-ceous layer to harvesting in a mixed coniferous-deciduous forest in New Brunswick, Canada. *For. Ecol. Manage.*, 2002, v. 155, pp. 17–31.
- [32] Ilintsev A.S., Amosova I.B., Tretyakov S.V. *Ekologo-biologicheskii analiz vliyaniya razlichnykh vidov rubok na strukturu travyano-kustarnichkovogo yarusy chernichnykh tipov lesa* [The effect of different cuttings on the ecological-biological structure of the grass-shrub layer in the blueberry forest]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering journal], 2019, v. 9, no. 1(33), pp. 31–43.
- [33] Melehev I.S. *Lesovodstvo* [Silviculture]. Moscow: MSFU, 2003, 320 p.

The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 23-76-01014, <https://rscf.ru/project/23-76-01014/>

Authors' information

Ilintsev Aleksey Sergeevich✉ — Cand. Sci. (Agriculture), Senior Research of the Northern Research Institute of Forestry, Associate Professor of the Department of Forestry and Forest Management of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, a.ilintsev@narfu.ru

Amosova Irina Borisovna — Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor of the Department of Forestry and Forest Management of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, i.amosova@narfu.ru

Received 08.08.2023.

Approved after review 04.09.2023.

Accepted for publication 23.08.2023.

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

ОЦЕНКА ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА В НАРУШЕННЫХ СИБИРСКИМ ШЕЛКОПРЯДОМ ТЕМНОХВОЙНЫХ ГОРНО-ТАЕЖНЫХ ЛЕСАХ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ

А.П. Мохирев[✉], С.М. Сультсон, П.В. Михайлов,
О.А. Слинкина, Н.Н. Кулакова, С.С. Кулаков,
Д.А. Демидко, Н.П. Мельниченко, А.А. Горошко

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

ale-mokhirev@yandex.ru

Представлены результаты полевых исследований по оценке запаса углерода в мертвой древесине темнохвойных лесных формаций, поврежденных в результате массовой дефолиации гусеницами сибирского шелкопряда. Проведено натурное обследование в границах Алтае-Саянского горно-таежного лесного района (Ирбейское лесничество Красноярского края). По наблюдениям установлено, что после двухлетнего периода, прошедшего с момента подавления вспышки размножения сибирского шелкопряда, наблюдается массовое усыхание темнохвойных лесов, обусловленное крайне низкой устойчивостью к потере хвои (при дефолиации от 25 % и выше древостой гибнут практически полностью). Определен отпад древостоя на момент исследования — в среднем 64 ± 25 %. Получены результаты по запасам накопления крупных древесных остатков (отпада древостоя, детрита) с последующим определением запасов углерода в мертвой древесине шелкопрядников. Выполнен анализ структуры запасов валежной древесины по стадиям разложения, который показал начало динамичного процесса появления свежего валежа с переходом во вторую стадию. Получены данные о среднем запасе углерода мертвой древесины в поврежденных участках — $16,6 \pm 7,4$ т/га с очевидным увеличением ее количества на перспективу. Полученные результаты могут служить основой для дальнейшего изучения динамики отпада и оценки баланса углерода в древостоях, претерпевших масштабные нарушения от воздействия фитофагов, что на региональном уровне важно для определения параметров эмиссии углерода в момент нарушения лесных экосистем и в последующие периоды.

Ключевые слова: сибирский шелкопряд, темнохвойные лесные формации, отпад древостоя, детрит, разложение древесины, запас углерода

Ссылка для цитирования: Мохирев А.П., Сультсон С.М., Михайлов П.В., Слинкина О.А., Кулакова Н.Н., Кулаков С.С., Демидко Д.А., Мельниченко Н.П., Горошко А.А. Оценка запасов углерода в нарушенных сибирским шелкопрядом темнохвойных горно-таежных лесах Красноярского края // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 6. С. 18–30. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-18-30

Изменения в структуре древостоя, вызванные нарушениями или старением деревьев доминирующей породы, влияют на углеродный баланс древостоев за счет снижения фотосинтеза и усиления гетеротрофного дыхания [1]. Углерод, хранящийся в валежной (мертвой) древесине, составляет примерно 8 % мировых запасов углерода в лесных экосистемах. Объем валежной древесины в лесах зависит от факторов прироста (нарушений, разреживания, старения) и факторов истощения (заготовки древесины и разложения) [2]. При этом мелкомасштабные нарушения не обязательно приводят к тому, что лес становится источником углерода. В зависимости от вида деревьев и зоны растительности разложение валежной древесины может длиться десятилетиями, тогда как быстрое естественное возобновление или обильный подрост могут компенсировать потерю доминирующих деревьев и смягчить повышенные эмиссии углерода [2, 3].

На процесс разложения валежной древесины значительное влияние оказывают климатические особенности, при этом такие редуценты, как микроорганизмы и насекомые, вносят свой вклад в изменение скорости разложения. В глобальном масштабе вклад насекомых в разложение валежной древесины и эмиссию углерода остается недостаточно изученным [4].

Для территорий умеренных и бореальных лесов характерно слабое положительное и отрицательное влияние насекомых (средняя потеря биомассы 0,9 % и –0,1 % в год соответственно). В тропических лесах насекомые ускоряют разложение валежной древесины, включая прямое потребление насекомыми древесины и косвенное воздействие через взаимодействие с микроорганизмами (средняя потеря биомассы составляет 3,9 % в год). В глобальном масштабе насекомые способны увеличить эмиссию углерода валежной древесиной на 29 %, что свидетельствует о важности учета их значения в глобальном углеродном цикле [4–6].

При естественных процессах валежник является постоянным структурным компонентом древостоев. В условиях фонового отпада насаждения могут, в конечном итоге, достигнуть устойчивого состояния, при котором объем валежной древесины будет изменяться в пределах равновесного состояния. Однако во многих лесах объем и качество валежной древесины более изменчивы вследствие повторяющихся нарушений. Эта изменчивость, фоновый отпад и варьирование скорости разложения древесины определяют динамику и доступность валежной древесины как среды обитания и стока углерода в экосистемах бореальных хвойных лесов.

Объем валежной древесины зависит не только от продуктивности участка, но и от стадии развития древостоя, а также промежутков между эпизодами массового усыхания деревьев, вызванных внешними и (или) внутренними факторами (например, от воздействия насекомых, от засухи) [7–9]. При отсутствии крупных нарушений позднесукцессионные древостои могут перейти в квазиравновесную стадию, в которой количество и качество валежной древесины можно рассматривать как относительно стабильные компоненты структуры древостоя. В бореальных лесах развитие такого состояния требует довольно продолжительного времени, и во многих типах леса квазиравновесная стадия, по-видимому, не наступит никогда, поскольку объем и качество валежной древесины сильно изменяются по причине возникновения нарушений [7].

Детрит в виде надземных крупных древесных остатков (КДО — англ. Coarse Woody Debris) представляет собой переходную стадию цикла углерода, когда углерод живой биомассы переходит в атмосферу или лесную подстилку в ходе процесса разложения. Это важный резервуар углерода в лесных экосистемах, который связывает потоки вещества между растительной массой и биокостной почвой [10].

Надземные грубые древесные остатки включают в себя сухостойные деревья (стоящие или зависшие на соседних мертвые деревья), валеж (частично или полностью погребенные в почвенном слое древесные стволы), пни и корни погибших по разным причинам деревьев, опавшие древесные фрагменты живых и сухостойных деревьев, массовый послепожарный, ветровальный валеж, порубочные остатки на вырубках [10]. На валеж приходится примерно 20 % общего углерода экосистемы в старовозрастных и вторичных лесах [11].

Эмпирические данные о содержании углерода в различных фракциях древесного отпада приведены в работе [1], авторами которой установлено, что стволовая древесина содержит 63 % углерода

древесного отпада, кора — 23 %, на корни и ветки приходится по 6 %, а в тонких тканях содержится 2 % общего углерода мертвой древесины. На содержание углерода также влияет положение древесных остатков: в валеже сосредоточено 78 % общего углерода, в то время как на сухостой приходится только 22 %. Также установлено, что в сильноразложившейся древесине содержится меньшее количество углерода, чем в древесных остатках низших классов разложения [1].

В целом основными предикторами интенсивности разложения мортмассы являются качество древесного субстрата (породный состав насаждения и положение валежника (контакт с землей)), количество и активность главных деструкторов субстрата, внешние абиотические условия, время разложения [2, 10].

Потеря массы древесины за год при разложении максимальна при коэффициенте увлажнения H , приближающемся к единице или от 0,9 до 2,1. Это оптимальный диапазон, необходимый для жизнедеятельности бактерий и грибов. Скорость разложения снижается при $H < 0,6$ и $H > 4$ [10].

В первый год разложение происходит быстрее, чем в последующее время, что связано с приростом биомассы грибов [10]. Основным фактором в процессе разложения древесных остатков является микробное дыхание, которое составляет 76 % потерь углерода из грубых древесных остатков [11].

На скорость разложения также влияет диаметр остатков стволов и ветвей (с корой или без нее). Скорость потери массы древесины ветвей, корней и стволов снижается с увеличением их диаметра [10].

В порядке убывания значимости факторы, влияющие на скорость разложения детрита, представлены диаметром древесных остатков, режимом увлажнения, температурой воздуха и породой дерева [12].

Для расчета динамики накопления углерода в валежной древесине, исходя из количественной оценки запасов углерода в древесных остатках, перспективными являются методические подходы, позволяющие строить имитационные модели, учитывающие динамику накопления и разложения древесных остатков (с упором на эмпирические конструкции моделей) [11]. Однако для построения прогнозных моделей необходимы знания, идентифицирующие особенности формирования детрита в различных условиях, позволяющих создать основу для оценки интенсивности разложения древесины и влияния данных процессов на объем углерода на региональном уровне. При этом отдельно следует рассматривать площади нарушенных лесов, претерпевающих интенсивные процессы отмирания деревьев, и



Рис. 1. Местоположение исследуемой территории
Fig. 1. Location of the study area

насаждений развивающихся по естественному циклу.

В сибирских регионах в настоящее время сохраняется проблема масштабной гибели темнохвойных лесов в результате массового размножения сибирского шелкопряда. Ситуация распространена во всех субъектах, в которых данный фитофаг является фоновым вредителем. Периоды массового размножения носят циклический характер и повторяются ориентировочно через каждые 10...15 лет. Вследствие воздействия вредителя формируются большие площади (десятки тысяч гектар) усыхающих темнохвойных древостоев, так называемых шелкопрядников, в которых концентрируются значительные объемы мертвой древесины, что отрицательно сказывается на углеродном балансе как регионального, так и глобального уровней (снижается функциональность живых насаждений, повышается вероятность возникновения пожаров).

Интенсивность формирования отпада в существенном масштабе и процессов разложения мортмассы на таких участках изучена недостаточно, что затрудняет проведение оценки запасов углерода, его депонирования и эмиссионных процессов в таких древостоях.

Цель работы

Цель работы — изучение объемов накопления крупных древесных остатков (отпада древостоя, детрита), определение запасов углерода в мертвой

древесине, пораженной сибирским шелкопрядом, образующейся в начальные периоды после вспышки размножения сибирского шелкопряда.

Материалы и методы

В рамках поставленной задачи проведено натурное обследование темнохвойных лесных формаций, поврежденных в результате массовой дефолиации гусеницами сибирского шелкопряда (вспышка размножения 2018–2020 гг.).

Территориально объект изучения находится в пределах Ирбейского лесничества Красноярского края (рис. 1). Ландшафтный комплекс характеризуется среднегорным рельефом и относится к Южно-Сибирской горной лесорастительной зоне, Алтае-Саянскому горно-таежному лесному району.

Переход популяции в фазу вспышки размножения произошел весной 2019 г., развитию чего способствовала недостаточная влагообеспеченность в продолжение всего вегетационного периода 2015 г., в июне, июле и сентябре 2016 г., на фоне повышенных среднесуточных температур [13]. По данным дистанционного зондирования на 10.08.2020 г. общая площадь поврежденных участков (дефолиация кроны на 75 % и более) составила 28 442 га.

Основной кормовой культурой сибирского шелкопряда в данном районе являются пихта сибирская (*Abies sibirica* L.) и сосна кедровая сибирская — кедр (*Pinus sibirica* Du Tour).

Региональная особенность темнохвойных формаций выражается в господстве зеленомошной группы, представленной набором типов леса [14]. Около половины насаждений относится к черничной и бадановой группам типов леса — 41,3 %, в основном представленным кедрово-пихтовыми древостоями (74,5 % общей площади черничной и бадановой групп типов леса). На разнотравно-зеленомошную группу типов леса приходится 28,1 %. Сосняки зеленомошные отмечаются фрагментарно и локально. Лиственничники горно-таежные не имеют широкого распространения, располагаясь, как и ельники, исключительно в ложбинах и по долинам рек. По возрастной структуре преобладают спелые и перестойные древостои. Средняя относительная полнота 0,5...0,7. В целом доля таких древостоев составляет более 54,6 % их общей площади. Высокополнотные древостои представлены преимущественно кедром. Условия местопроизрастания лесов на территории характеризуются в среднем III–IV классами бонитета (94,6 %). Высокобонитетные насаждения представлены березовыми и осиновыми древостоями, более 85,0 % низкобонитетных лесов относятся к кедрово-пихтовым древостоям долгомошного и зеленомошного типов. Отдельные участки насаждений представлены высокобонитетными березовыми и осиновыми древостоями травяной группы типов леса.

При проведении полевых исследований за основу приняты ранее разработанные и ставшие широко известными приемы и методы мониторинга, которые редактировались с учетом специфики выполнения работ в древостоях, поврежденных сибирским шелкопрядом в результате его массового размножения.

За основу перечета деревьев на нарушенных участках леса взята оптимизированная методика, разработанная научными сотрудниками Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН совместно с Институтом биогеохимии Макса Планка (г. Йена, Германия) [15]. Пробные площади закладывались из трех концентрических кругов в целях полного перечета деревьев в них в зависимости от диаметра ствола дерева: диаметр первого концентрического круга — 3,5 м, второго — 7,5 м, третьего — 15,0 м.

На пробных площадях проведены таксация древесного яруса, учет подроста и подлеска, определен состав живого напочвенного покрова и КДО.

Крупные древесные остатки определялись как все надземные древесные остатки диаметром не менее 5 см в тонком конце. Структурно КДО подразделены на три основные группы:

1) сухостой — отмершие, но не упавшие на поверхность лесной подстилки дерева (стоя-

щие на корню или зависшие в кронах соседних деревьев);

2) валежник — в разной степени разложившиеся деревья или их части, расположенные на поверхности и в толще лесной подстилки;

3) пни (высота $H = 10...30$ см) и части сухостойных деревьев без верхушки, оставшиеся на корню и возвышающиеся над поверхностью почвы на высоту слома.

При расчетах запаса валежа объемы пней были отнесены к категории «валежная древесина» и при расчетах учтены в общем значении.

Разбивка пробной площади на местности осуществлялась по сторонам света. Перечет деревьев в первом концентрическом круге пробной площади — сплошной. Минимальная длина окружности деревьев, принимаемая в перечет — 10 см. Во втором круге перечету подлежали деревья, минимальная длина окружности которых составляла 30 см. Минимальная длина окружности деревьев при перечете деревьев в третьем круге пробной площади — 60 см. При перечете древостоя для каждого дерева были определены длина окружности ствола на высоте 1,3 м от поверхности земли, его максимальная высота, высота основания кроны, высота самой широкой части кроны, класс Крафта, категория технической годности, повреждения, статус дерева (живое/мертвое), причина отмирания.

Возрастная структура древостоя установлена путем отбора кернов.

На каждой пробной площади проведен сплошной учет стволового валежа и пней отдельно по породам в зависимости от его размещения в радиусе 7,5 или 15 м. Учет валежника и пней выполнен с разбиением по стадиям разложения с измерением линейных параметров. У валежника измерены длина и диаметры двух противоположных концов, у пней — с учетом высоты и двух диаметров: на высоте спила (или слома) и у шейки корня, у сухостоя — высоты и диаметра на высоте 1,3 м от поверхности земли. Разделение по классам разложения проведено по следующим признакам: 1-я стадия разложения — древесина не утратила своей твердости, на стволах сохраняются кора и ветви; 2-я — древесина частично утратила твердость, кора довольно легко отслаивается, есть крупные и мелкие ветви; 3-я — древесина почти полностью утратила свою твердость, на стволах в незначительном количестве имеются кора и крупные ветви.

Выполнена визуальная оценка живого напочвенного покрова (геоботаническое описание).

Объем крупных древесных остатков определен в соответствии с общепринятыми методами таксации [16].

Характеристика пробных площадей

Characteristics of sample areas

Но- мер проб- ной пло- щади	Шифр пробной площади	Географические координаты WGS84 EPSG: 4326		Состав древостоя	Возраст древостоя, лет	Средняя высота древостоя, м	Средний диаметр древостоя, см	Бонитет	Тип леса	Полнота	Запас, м ³ /га	Экспозиция по сторонам света	Крутизна склона, град
		широта	долгота										
1	СТ 6	55,029706	96,034790	4КЗП1С2Б	170	25	40	3	Ч	0,8	410	ЮЗ	11
2	СТ 5	55,026988	96,034302	4КЗП1С2Б	170	25	40	3	Ч	0,8	410	«←»	11
3	СТ 2	55,045299	96,033449	4К4П2Б	160	22	32	4	БД	0,7	320	Рав- нина	—
4	СТ 1	55,013966	96,034513	4КЗП2Б1Ос	170	24	40	3	Ч	0,7	340	Ю	17
5	СТ 7	55,056510	96,043426	3К6П1Б	180	22	28	4	БД	0,6	270	Рав- нина	—
6	Ирбей 80	55,025577	96,030275	5КЗП1С1Б	170	25	40	3	Ч	0,7	360	СВ	12
7	СТ 3	55,032075	96,041611	3К6П1Б+С	180	22	36	4	Ч	0,8	360	«←»	12
8	Ирбей ПВ6	55,028627	96,031833	3КЗП1С2Б1ОС	170	22	36	4	Ч	0,8	360	ЮЗ	12
9	Ирбей 100	55,044977	96,026897	3К5П2Б	150	22	28	4	БД	0,8	340	Рав- нина	—
10	Ирбей 75–100	55,049824	96,028041	6П2К2ОС	110	22	22	3	ЗМ	0,7	260	«←»	—
11	Ирбей 95	55,031191	96,035963	3К3С2П2ОС	170	22	32	4	Ч	0,8	380	«←»	—
12	СТ 4	55,033426	96,036581	3К3С2П2ОС	170	22	32	4	Ч	0,8	380	«←»	—
13	СТ 8	55,070925	96,032492	4К4П2Б	160	22	28	4	Ч	0,6	270	«←»	—
14	СТ 9	55,070119	96,029684	4К4П2Б	160	22	28	4	Ч	0,6	270	«←»	—

Примечание. Типы леса: Ч — черничниковый; БД — бадановый; ЗМ — зеленомошный.

Запасы углерода рассчитаны по конверсионно-объемному методу [17], положенному в основу приказа Минприроды РФ от 27 мая 2022 г. № 371 «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов» [18]. Значение запаса углерода рассчитано как для древостоя, так и для мертвой древесины.

Исходными показателями служил запас мертвой древесины породы дерева в определенном возрастном состоянии. Запас углерода в мертвой древесине по группам возраста преобладающих пород рассчитан по формуле

$$CD_{ij} = V_{ij} \cdot KD_{ij},$$

где CD_{ij} — запас углерода в мертвой древесине насаждений группы возраста i преобладающей породы j , т;

V_{ij} — объемный запас ствольной древесины насаждений группы возраста i преобладающей породы j , м³;

KD_{ij} — конверсионный коэффициент для расчета запаса углерода в мертвой части насаждений группы возраста i преобладающей породы j , т·С/м³ [18].

Аналогичная формула была использована для расчета запаса углерода в живой части древостоя с применением соответствующих конверсионных коэффициентов (т·С/м³) для расчета запаса углерода в биомассе древостоя по объемному запасу древесины лесного насаждения [18]. Расчет запаса углерода в лесной подстилке и почве не входил в задачу исследования, поскольку натурные обследования были ориентированы преимущественно на дальнейшее применение полученных результатов по формированию процессов отпада в древостоях, поврежденных сибирским шелкопрядом, для измерений указанных параметров по данным спутниковых фотоснимков [18].

В качестве исходных данных были использованы таксационные характеристики 14 пробных площадей, из них 11 — на участках, поврежденных сибирским шелкопрядом и три контрольные пробные площади (за пределами очага повреждений) (табл. 1). Обследование проведено в июле 2022 г. В табл. 2 представлены запасы КДО, рассчитанные по данным полевых обследований. На рис. 2 приведено процентное соотношение запасов валежа, в зависимости от стадии разложения, в пределах исследуемых участков.

Т а б л и ц а 2

Запасы крупных древесных остатков, по данным полевых обследований

Stocks of large woody debris, according to field survey data

Но- мер проб- ной пло- щади	Шифр проб- ной пло- щади	Стволовой запас древо- стоя, м ³ /га		Состав по породам		Запас, м ³ /га										От- пад, %		
		об- щий	в том числе жизне- способ- ных деревьев	сухой	валежная древесина	сухой по породам					валежная древесина по породам							
						все- го	П	К	Е	Б	все- го	П	К	Е	С		Б	Лц
1	СТ 6	256	102	6П4К	5К5П	154	86	68	-	-	143	47	96	-	-	-	-	60,2
2	СТ 5	226	173	7П3К	8К2П	53	41	12	-	-	55	13	42	-	-	-	-	23,5
3	СТ 2	377	228	10К	10П ед. К	149		149	-	-	97	95	2	-	-	-	-	39,5
4	СТ 1	369	43	5П4К1Е	6П3С1К+Е	326	150	127	49	-	31	20	2	1	8	-	-	88,3
5	Ирбей 80	581	138	9К1П	6К3П1Б	443	54	389	-	-	7	2	4	-	-	1	-	76,2
6	СТ 3	287	143	8К2П	10П+К+Лц	144	39	105	-	-	107	104	2	-	-	-	1	50,2
7	Ирбей ПВ6	287	198	5К5П	6К4П ед. Е	89	41	48	-	-	153	74	77	2	-	-	-	31,0
8	Ирбей 100	486	0	6К3П+Е+Б	5П2К2Б1С	486	147	296	18	25	53	29	8	-	5	10	-	100,0
9	Ирбей 75- 100	305	92	6П4Кед.Е	10П	213	141	67	5	-	68	68	-	-	-	-	-	69,8
10	Ирбей 95	414	37	5К5П	6К4П	377	191	186	-	-	227	143	84	-	-	-	-	91,1
11	СТ 4	524	129	9К1П+Е	4К4П2Е	395	101	285	9	-	90	37	34	19	-	-	-	75,4
12	СТ 7	256	233	10П	9П1Б+К	23	23	-	-	-	287	256	2	-	-	19	-	9,0
13	СТ 8	241	222	7П3К	9П1Б+Е	19	13	6	-	-	57	52	-	2	-	3	-	7,9
14	СТ 9	284	268	10П	10П+Е	16	16	-	-	-	47	46	-	1	-	-	-	5,6

Примечание. Контрольные участки: СТ 7, СТ 8, СТ 9; породы: П — пихта; К — кедр; Е — ель; Б — береза; Лц — лиственница.

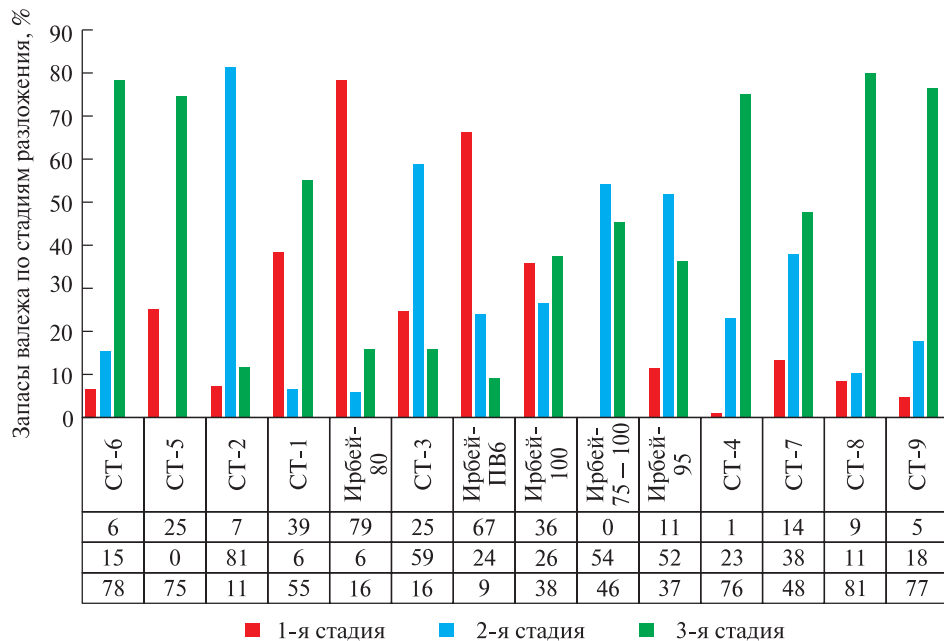


Рис. 2. Структура запасов валежа в зависимости от стадии разложения: контрольные участки: СТ 7, СТ 8, СТ 9

Fig. 2. Structure of dead wood stocks depending on the decomposition stage: control plots: СТ 7, СТ 8, СТ 9

Результаты и обсуждение

По полученным наблюдениям после двухлетнего периода с момента подавления вспышки размножения сибирского шелкопряда наблюдается массовое усыхание темнохвойных лесов. Обусловлено это тем, что темнохвойные породы крайне неустойчивы к потере хвои, и при дефолиации от 25 % и выше гибнут практически полностью. Это подтверждено во всех работах, в которых динамика отмирания исследована количественно [19–21] или даны качественные оценки [22]. По данным работы [19], отмирание завершается в течение трех лет. В целом согласуются с ними и результаты исследований в древостоях пихты сибирской с участием ели сибирской [21] — через три года после дефолиации эти породы полностью выпадают из состава древостоев. Отмирание деревьев пихты при дефолиации от 25 до 75 % варьирует примерно от 30 % [20] до 75 % [21] и продолжается, ориентировочно, спустя пять лет после повреждения [21]. При частичной дефолиации у деревьев пихты проявляются попытки восстановить крону, однако атаки стволовых вредителей заканчиваются гибелью для значительной части из них в течение нескольких лет [21, 22]. Более слабая дефолиация приводит к отмиранию в среднем 10...20 % деревьев пихты [19, 20]. Для отдельных древостоев степень усыхания этой породы может варьировать от единичных деревьев до практически полного выпадения ее из древостоя [21]. В некоторых случаях значительный отпад пихты наблюдается даже за пределами дефолированных древостоев [21], что может быть связано с повреждением их стволовыми вредителями, мигрировавшими из очагов массового размножения, которые сформировались в поврежденных сибирским шелкопрядом участках [23, 24].

Отпад древостоя на момент исследования составил в среднем 64 ± 25 % (значения варьируют в пределах от 24 до 100 %). Значительные площади представлены участками с концентрацией сухостойных деревьев пихты и кедра. Часть древостоя находится на стадии отмирания. Обилие отмирающих пихт в очагах массового размножения сибирского шелкопряда объясняет их слабое заселение стволовыми насекомыми: запас их корма слишком велик, а его качество быстро понижается. По этой причине вклад короедов и усачей в развитие начальных стадий разрушения древесины в очагах шелкопряда — минимален. На третий-четвертый год наблюдается массовый отпад коры, крупных ветвей и вершин деревьев. Отпад стволов достигает максимума еще через три — пять лет [25]. Спустя

примерно 15 лет после сильной (70...100 %) дефолиации живых деревьев пихты сибирской в очагах распространения сибирского шелкопряда не обнаружено [20].

Отмирание кедра сибирского в древостоях, где он (кедр) участвовал в составе в равных или меньших долях с пихтой, протекает менее интенсивно: даже при дефолиации 50...75 % общая доля усохших деревьев и текущего отпада сравнительно невелика. Лишь изредка текущий отпад для кедра превышает 20 %, причем в некоторых случаях гибель деревьев намного интенсивнее происходит при слабой (до 25 %) дефолиации [21]. Последнее можно предположительно связать с неблагоприятными условиями произрастания, большим возрастом или наличием дополнительных стрессов [24].

Анализ структуры запасов валежной древесины по стадиям разложения (см. рис. 2) показывает начало динамичного процесса появления свежего валежа с переходом во вторую стадию. Общей закономерности в данном соотношении не наблюдается, поскольку в настоящий момент древостой находится на начальной стадии распада, в связи с чем накопление валежника первой стадии в ближайшие два-три года будет увеличиваться. На контрольных участках в темнохвойных древостоях наблюдается противоположная ситуация, доминирует старый валеж (48...81 %), сформировавшийся в результате естественных процессов отмирания или воздействия климатических факторов (ветровалов, буреломов). Процент отпада деревьев не превысил 10 %.

По данным Ю.Н. Баранчикова, В.Д. Перевозниковой [27] спустя 10–12 лет после повреждения 60...70 % объема древесины пихты, ели и кедра относится ко II и III стадии разложения. Влажность сухостойной древесины ниже, чем у здоровой, что приводит к резкому увеличению пожароопасности шелкопрядников. По литературным данным, влажность древесины при отмирании деревьев резко повышается только первые три-четыре года. Это создает благоприятные условия для поселения дереворазрушающих грибов. Затем влажность уменьшается и через пять-шесть лет становится ниже нормальной влажности неповрежденных деревьев и значительно снижается через 10–12 лет. В интервале пять — семь лет после усыхания гнилью поврежден сухостой пихты сибирской — 26,8 %, ели — 58,3, кедра — 43,1; валежа пихты — 81,1, ели — 98,7, кедра — 100 %. Мертвая древесина разрушается тем сильнее, чем больше она повреждена насекомыми [26, 27].

В перспективе площади участков, поврежденных сибирским шелкопрядом, частично зарастут злаками и лиственными породами, будут заболочены. В момент обследования на этих участках

Т а б л и ц а 3

Показатели запасов углерода в древостое и мертвой древесине (детрите), формируемой в результате отпада в темнохвойных древостоях после воздействия вспышки массового размножения сибирского шелкопряда

Indicators of carbon stock in the stand and dead wood (detritus) formed as a result of mortality in dark coniferous stands after Siberian silk moth mass reproduction outbreak

Номер пробной площади	Шифр пробной площади	древостой	Запас углерода, т·С/га												всего в мертвой древесине
			сухостой по породам					валежная древесина по породам							
			итого	П	К	Е	Б	итого	П	К	Е	С	Б	Лц	
1	СТ 6	34	7,9	5,4	2,5	–	–	6,5	3,0	3,5	–	–	–	3,0	14,4
2	СТ 5	58	3,0	2,6	0,4	–	–	2,4	0,8	1,5	–	–	–	0,8	5,4
3	СТ 2	77	5,5	0,0	5,5	–	–	6,1	6,0	0,1	–	–	–	6,0	11,6
4	СТ 1	14	17,6	9,5	4,7	3,4	–	1,4	1,3	0,1	0,1	–	–	1,3	19,0
5	Ирбей 80	47	17,7	3,4	14,3	–	–	0,3	0,1	0,1	–	0,0	–	0,1	18,0
6	СТ 3	48	6,3	2,5	3,9	–	–	6,8	6,6	0,1	–	–	0,1	6,6	13,1
7	Ирбей ПВ6	67	4,4	2,6	1,8	–	–	7,7	4,7	2,8	0,1	–	–	4,7	12,0
8	Ирбей 100	0	22,6	9,3	10,9	1,3	1,1	2,6	1,8	0,3	–	0,5	–	1,8	25,1
9	Ирбей 75–100	31	10,6	8,4	1,9	0,4	–	–	4,0	–	–	–	–	4,0	10,6
10	Ирбей 95	12	18,9	12,1	6,8	–	–	12,1	9,1	3,1	–	–	–	9,1	31,1
11	СТ 4	43	17,5	6,4	10,5	0,6	–	4,9	2,3	1,2	1,3	–	–	2,3	22,4
12	СТ 7	79	1,5	1,5	0,0	–	–	16,3	16,2	0,1	–	–	–	16,2	17,7
13	СТ 8	75	1,0	0,8	0,2	–	–	3,4	3,3	–	0,1	–	–	3,3	4,5
14	СТ 9	90	1,0	1,0	0,0	–	–	3,0	2,9	–	0,1	–	–	2,9	4,0

Примечание. Контрольные участки: СТ 7, СТ 8, СТ 9; породы: П — пихта; К — кедр; Е — ель; Б — береза; Лц — лиственница.

в результате изреживания полога и повышения светового притока наблюдалось обилие светолюбивых трав, осоки и злаков, происходило задержание почвы.

Площади участков, поврежденных сибирским шелкопрядом, достигают десятков тысяч гектар, и углеродный баланс на таких территориях однозначно имеет свой перечень специфических особенностей в процессе гибели насаждения и сукцессии. После переноса углерода из живой биомассы в мертвое органическое вещество углерод будет, по крайней мере, частично, высвобождаться в атмосферу посредством постепенного разложения гетеротрофными микроорганизмами [9]. Результаты расчетов запасов углерода в древостое и мертвой древесине участков древостоя, пораженных сибирским шелкопрядом, спустя два года после массовой дефолиации представлены в табл. 3. В среднем запас углерода мертвой древесины в поврежденных шелкопрядом участках составил $16,6 \pm 7,4$ т·С/га, очевидно, в последующие годы это значение будет возрастать, что требует проведения дополнительных наблюдений.

Выводы

Методом натурных обследований темнохвойных лесных формаций, поврежденных в результате массовой дефолиации гусеницами

сибирского шелкопряда (вспышка массового размножения 2018–2020 гг.), получены данные по запасам накопления крупных древесных остатков (отпада древостоя, детрита) с последующим определением количества углерода в мертвой древесине. Они могут служить основой для дальнейшего изучения динамики отпада и оценки баланса углерода в древостоях, претерпевших масштабные нарушения от воздействия фитофагов, что на региональном уровне важно для определения параметров эмиссии углерода в момент нарушения лесных экосистем и в последующие периоды. В перспективе представленные материалы могут быть востребованы для оценки процессов формирования отпада в древостоях, поврежденных сибирским шелкопрядом, для измерений рассматриваемых параметров по данным спутниковых фотоснимков, позволяющих охватывать обширные территории, в том числе труднодоступные.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России на выполнение коллективом научной лаборатории «Защита леса» проекта «Фундаментальные основы защиты лесов от энтомо- и фитовредителей в Сибири» (№ FEFE-2020-0014).

Авторы выражают особую благодарность Красноярскому региональному центру коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН за предоставленное оборудование для обеспечения выполнения проекта «Фундаментальные основы защиты лесов от энтомо- и фитовредителей в Сибири» (№ FEFE-2020-0014).

Список литературы

- [1] Martin A.R., Domke G.M., Doraisami M. Carbon fractions in the world's dead wood // *Nature Communications*, 2021, no. 12, p. 889. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21149-9>.
- [2] Šēnhofa S., Jaunslaviete I., Šņepsts G., Jansons J., Liepa L., Jansons Ā. Deadwood Characteristics in Mature and Old-Growth Birch Stands and Their Implications for Carbon Storage // *Forests*, 2020, v. 11, p. 536. <https://doi.org/10.3390/f11050536>
- [3] Griffiths H.M., Eggleton P., Hemming-Schroeder N., Swinfield T., Woon J.S., Allison S.D., Coomes D.A., Ashton L.A., Parr C.L. Carbon flux and forest dynamics: Increased deadwood decomposition in tropical rainforest tree-fall canopy gaps // *Global change biology*, 2021, v. 27, no. 8, pp. 1601–1613.
- [4] Seibold S., Rammer W., Hothorn T., Seidl R., Ulyshen M.D., Lorz J., Aragón R. The contribution of insects to global forest deadwood decomposition // *Nature*, 2021, no. 597, pp. 77–81. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03740-8>
- [5] Reed D.E., Ewers B.E., Pendall E., Frank J., Kelly R. Bark beetle-induced tree mortality alters stand energy budgets due to water budget changes // *Theoretical and Applied Climatology*, 2018, v. 131, no. 1, pp. 153–165.
- [6] Clark K.L., Skowronski N., Hom J. Invasive insects impact forest carbon dynamics // *Global Change Biology*, 2010, v. 16, no. 1, pp. 88–101.
- [7] Aakala T. Tree mortality and deadwood dynamics in late-successional boreal forests // *Dissertationes Forestales*, 2010, v. 100, p. 41.
- [8] Monaco A.L., Latterini F., Tavankar F., Luziatelli G. Structure and dynamics of deadwood in pine and oak stands and their role in CO₂ sequestration in lowland forests of Central Italy // *Forests*, 2020, v. 11, no. 3, p. 253.
- [9] Fei S., Morin R., Oswald C., Liebhold A.M. Biomass losses resulting from insect and disease invasions in US forests // *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, v. 116, no. 35, pp. 17371–17376.
- [10] Карелин Д.В., Уткин А.И. Скорость разложения крупных древесных остатков в лесных экосистемах // *Лесоведение*, 2006. № 2. С. 26–33.
- [11] Russell M., Fraver S., Aakala T., Fraver S., Gove J.H. Quantifying carbon stores and decomposition in dead wood // A review, *Forest Ecology and Management*, 2015, v. 350, pp. 107–128. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.04.033>
- [12] Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И. Запасы дегриза, его депонирование и разложение в лесном фонде России: результаты расчетов // *Проблемы лесной фитопатологии и микологии: Материалы 6-й Междунар. конф., Петрозаводск, Карелия, 18–22 сентября 2005 г. Петрозаводск: Изд-во Института леса КарНЦ РАН, 2005. С. 136–141.*
- [13] Kharuk V.I., Im S.T., Soldatov V.V. Siberian silkmoth outbreaks surpassed geoclimatic barrier in Siberian Mountains // *J. of Mountain Science*, 2020, v. 17, pp. 1891–1900. DOI:10.1007/s11629-020-5989-3
- [14] Смагин В.Н., Ильинская С.А., Назимова Д.И., Новосельцева И.Ф., Чередникова Ю.С. Типы лесов гор Южной Сибири. Новосибирск: Наука, 1980. 336 с.
- [15] Schulze E.-D., Heimann M., Harrison S., Holland E., Lloyd J. *Global Biogeochemical Cycles in the Climate System*. Jena: Academic Press, 2010, p. 345.
- [16] Анучин Н.П. Лесная таксация. М.: Лесная пром-сть, 1982. 552 с.
- [17] Замолодчиков Д.Г., Уткин Г.Н., Коровин А.И. Определение запасов углерода по зависимым от возраста насаждений конверсионно-объемным коэффициентам // *Лесоведение*, 1998. № 3. С. 84–93.
- [18] Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 27 мая 2022 г. № 371 «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов». URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202207290034> (дата обращения 11.12.2022).
- [19] Журавлев Г.П. Рекомендации по надзору за сибирским шелкопрядом в лесах Дальнего Востока. Хабаровск: Изд-во ДальНИИЛХ, 1960. 33 с.
- [20] Ряполов В.Я. Формирование избыточно-плотных популяций черного пихтового усача в очагах хвоегрызущих насекомых и его численность в разреженных популяциях // *Леса Урала и хозяйство в них. Екатеринбург, 2001. Вып. 21. С. 319–333.*
- [21] Гродницкий Д.Л., Разнобарский В.Г., Солдатов В.В., Ремарчук Н.П. Деграция древостоев в таежных шелкопрядниках // *Сибирский экологический журнал*, 2002. Приложение 1. С. 3–12.
- [22] Криволицкая Г.О. Скрытостволовые вредители в темных хвойных лесах Западной Сибири, поврежденных сибирским шелкопрядом. М.; Л.: Наука, 1965. 130 с.
- [23] Исаев А.С., Рожков А.С., Киселев В.В. Черный пихтовый усач *Monochamus urussovi* (Fisch.). Новосибирск: Наука, 1988. 270 с.
- [24] Kharuk V.I., Fedotova E.V., Demidko D., Dvinskaya M.L. Spatial and temporal dynamics of Siberian silkmoth large-scale outbreak in dark-needle coniferous tree stands in // *Contemporary Problems of Ecology*, 2016, v. 9 (№ 6), pp. 711–720. DOI:10.1134/S199542551606007X
- [25] Перевозникова В.Д., Баранчиков Ю.Н. Структура запасов наземной фитомассы в свежих шелкопрядниках пихтовой тайги Нижнего Приангарья // *Энтомологические исследования в Сибири. Красноярск: Изд-во КФ СО РЭО, 1999. Вып. 2. С. 87–102.*
- [26] Баранчиков Ю.Н., Перевозникова В.Д., Кондаков Ю.П., Кириченко Н.И. Зоогенный вклад в эмиссии углерода в очагах массового размножения сибирского шелкопряда // *Лесные экосистемы Енисейского меридиана (исследования по международной геосферно-биосферной программе)*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. С. 117–123.
- [27] Баранчиков Ю.Н., Перевозникова В.Д. Очаги массового размножения сибирского шелкопряда как источники дополнительного выброса углерода // *Чтения памяти В.Н. Сукачева. XX. Насекомые в лесных биогеоценозах. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2004. С. 32–53.*

Сведения об авторах

Мохирев Александр Петрович [✉] — д-р. техн. наук, вед. инж. лаборатории «Защита леса», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», ale-mokhirev@yandex.ru

Сультсон Светлана Михайловна — канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр. лаборатории «Защита леса», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», sultson2011@yandex.ru

Михайлов Павел Владимирович — канд. с.-х. наук, вед. науч. сотр. лаборатории «Лесных экосистем», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», mihaylov.p.v@mail.ru

Слинкина Ольга Александровна — инж. лаборатории «Защита леса», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», sloa@mail.ru

Кулакова Надежда Николаевна — канд. с.-х. наук, мл. науч. сотр. лаборатории «Защита леса», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», nadezha21@mail.ru

Кулаков Сергей Сергеевич — канд. биол. наук, ст. науч. сотр. лаборатории «Защита леса», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», hbz_sibstu@mail.ru

Демидко Денис Александрович — канд. биол. наук, ст. науч. сотр. лаборатории «Защита леса», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», sawer-beetle@yandex.ru

Мельниченко Наталья Павловна — мл. науч. сотр. лаборатории «Защита леса», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», natalia.melnichenko@mail.ru

Горошко Андрей Александрович — мл. науч. сотр. лаборатории «Защита леса», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», 902970@list.ru

Поступила в редакцию 01.03.2023.

Одобрено после рецензирования 17.04.2023.

Принята к публикации 06.10.2023.

CARBON STOCK ASSESSMENT IN DARK CONIFEROUS MOUNTAIN TAIGA FORESTS OF KRASNOYARSK INFESTED BY SIBERIAN SILKMOTH

A.P. Mokhirev✉, S.M. Sultson, P.V. Mikhaylov,
O.A. Slinkina, N.N. Kulakova, S.S. Kulakov,
D.A. Demidko, N.P. Melnichenko, A.A. Goroshko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 31, Krasnoyarskii rabochii av., 660037, Krasnoyarsk, Russia
ale-mokhirev@yandex.ru

The results of field studies on the assessment of carbon stock in the dead wood of dark coniferous forest formations damaged as a result of mass defoliation caused by Siberian silkmoth caterpillars are presented. The full-scale survey was carried out within the boundaries of the Altai-Sayan Mountains taiga forest region (Irbeisk forestry in the Krasnoyarsk Territory). According to the obtained observations, after a two-year period since the outbreak suppression, there is a massive withering of dark coniferous forests due to extremely low resistance to the loss of needles (with defoliation from 25 % and more, stands die almost completely). The stand mortality at the time of the study averaged 64 ± 25 %, the values vary from 24 to 100 %. The results on the standing volume of large wood residues (stand mortality, detritus) were obtained, followed by the carbon stock assessment in the dead wood damaged by silk moth. Analysis of the structure of dead wood stocks by decomposition stages reveals the beginning of a dynamic process of the appearance of newly dead wood with the transition to the second stage. On average, the carbon stock of dead wood in the damaged areas was $16,6 \pm 7,4$ t C/ga with an obvious increase in the amount in the future. The results obtained are the basis for further study of the decay dynamics and assessment of the carbon balance in stands that have undergone large-scale disturbances from phytophages, which is important at the regional level for determining the parameters of carbon emissions at the time of forest ecosystems disturbance and in subsequent periods.

Keywords: Siberian silkmoth, dark coniferous forest formations, stand decay, detritus, wood decomposition, carbon stock

Suggested citation: Mokhirev A.P., Sultson S.M., Mikhaylov P.V., Slinkina O.A., Kulakova N.N., Kulakov S.S., Demidko D.A., Melnichenko N.P., Goroshko A.A. *Otsenka zapasov ugleroda v narushennykh sibirskim shelkopryadom temnokhvoinnykh gorno-taizhnykh lesakh Krasnoyarskogo kraja* [Carbon stock assessment in dark coniferous mountain taiga forests of Krasnoyarsk infested by Siberian silkmoth]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 6, pp. 18–30. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-18-30

References

- [1] Martin A.R., Domke G.M., Doraisami M. Carbon fractions in the world's dead wood. *Nature Communications*, 2021, no. 12, p. 889. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21149-9>.
- [2] Šenhofa S., Jaunslaviete I., Šņepsts G., Jansons J., Liepa L., Jansons Ā. Deadwood Characteristics in Mature and Old-Growth Birch Stands and Their Implications for Carbon Storage. *Forests*, 2020, v. 11, p. 536. <https://doi.org/10.3390/f11050536>
- [3] Griffiths H.M., Eggleton P., Hemming-Schroeder N., Swinfield T., Woon J.S., Allison S.D., Coomes D.A., Ashton L.A., Parr C.L. Carbon flux and forest dynamics: Increased deadwood decomposition in tropical rainforest tree-fall canopy gaps. *Global change biology*, 2021, v. 27, no. 8, pp. 1601–1613.
- [4] Seibold S., Rammer W., Hothorn T., Seidl R., Ulyshen M.D., Lorz J., Aragón R. The contribution of insects to global forest deadwood decomposition. *Nature*, 2021, no 597, pp. 77–81. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03740-8>
- [5] Reed D.E., Ewers B.E., Pendall E., Frank J., Kelly R. Bark beetle-induced tree mortality alters stand energy budgets due to water budget changes. *Theoretical and Applied Climatology*, 2018, v. 131, no. 1, pp. 153–165.
- [6] Clark K.L., Skowronski N., Hom J. Invasive insects impact forest carbon dynamics. *Global Change Biology*, 2010, v. 16, no. 1, pp. 88–101.
- [7] Aakala T. Tree mortality and deadwood dynamics in late-successional boreal forests. *Dissertationes Forestales*, 2010, v. 100, p. 41.
- [8] Monaco A.L., Latterini F., Tavankar F., Luziatelli G. Structure and dynamics of deadwood in pine and oak stands and their role in CO₂ sequestration in lowland forests of Central Italy. *Forests*, 2020, v. 11, no. 3, p. 253.
- [9] Fei S., Morin R., Oswalt C., Liebhold A.M. Biomass losses resulting from insect and disease invasions in US forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, v. 116, no. 35, pp. 17371–17376.
- [10] Karelin D.V., Utkin A.I. *Skorost' razlozheniya krupnykh drevesnykh ostatkov v lesnykh ekosistemah* [Decomposition rate of large wood residues in forest ecosystems]. *Lesovedenie [Forestry]*, 2006, no. 2, pp. 26–33.
- [11] Russell M., Fraver S., Aakala T., Fraver S., Gove J.H. Quantifying carbon stores and decomposition in dead wood. A review, *Forest Ecology and Management*, 2015, v. 350, pp. 107–128. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.04.033>
- [12] Zamolodchikov D.G., Utkin A.I. *Zapasy debris, ego deponirovanie i razlozhenie v lesnom fonde rossii: rezul'taty raschetov* [Stocks of debris, its deposition and decomposition in the forest fund of Russia: results of calculations. *Problemy lesnoy fitopatologii i mikologii* [Problems of forest Phytopathology and Mycology], Petrozavodsk, Karelia, September 18–22, 2005. Petrozavodsk: Karelns RAS Forest Institute, 2005, pp. 136–141.


- [13] Kharuk V.I., Im S.T., Soldatov V.V. Siberian silkworm outbreaks surpassed geoclimatic barrier in Siberian Mountains. *J. of Mountain Science*, 2020, v. 17, pp. 1891–1900. DOI:10.1007/s11629-020-5989-3
- [14] Smagin V.N., Il'inskaya S.A., Nazimova D.I., Novosel'tseva I.F., Cherednikova Yu.S. *Tipy lesov gor Yuzhnoy Sibiri* [Types of forests of the mountains of Southern Siberia]. Novosibirsk: Nauka, 1980. 336 p.
- [15] Schulze E.-D., Heimann M., Harrison S., Holland E., Lloyd J. *Global Biogeochemical Cycles in the Climate System*. Jena: Academic Press, 2010, p. 345.
- [16] Anuchin N.P. *Lesnaya taksatsiya* [Forest taxation]. M.: Forest Industry, 1982. 552 p.
- [17] Zamolodchikov D.G., Utkin G.N., Korovin A.I. *Opreделение zapasov ugleroda po zavisimym ot vozrasta nasazhdeniy konversionno-ob'emnym koeffitsientam* [Determination of carbon reserves by age-dependent plantings conversion-volume coefficients]. *Lesovedenie* [Forest science], 1998, no. 3, pp. 84–93.
- [18] *Prikaz Ministerstva prirodnnykh resursov i ekologii Rossiyskoy Federatsii ot 27 maya 2022 g. № 371 «Ob utverzhdenii metodik kolichestvennogo opredeleniya ob'emov vybrosov parnikovykh gazov i pogloshcheniy parnikovykh gazov»* [Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation dated May 27, 2022. no. 371 «On approval of methods for quantitative determination of greenhouse gas emissions and greenhouse Gas uptake»]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202207290034> (accessed 11.12.2022).
- [19] Zhuravlev G.P. *Rekomendatsii po nadzoru za sibirskim shelkopryadom v lesakh Dal'nego Vostoka* [Recommendations for the supervision of the Siberian silkworm in the forests of the Far East]. Khabarovsk: Dal'nILKH, 1960, 33 p.
- [20] Ryapolov V.Ya. *Formirovaniye izbytochno-plotnykh populyatsiy chernogo pikhtovogo usacha v ochagakh khvoegryzushchikh nasekomykh i ego chislennost' v razrezhennykh populyatsiyakh* [Formation of excessively dense populations of black fir barbel in foci of needle-gnawing insects and its number in sparse populations]. *Lesnaya Urala i khozyaystvo v nikh* [Forests of the Urals and the economy in them], 2001, v. 21, pp. 319–333.
- [21] Grodnitskiy D.L., Raznobarskiy V.G., Soldatov V.V., Remarchuk N.P. *Degradatsiya drevostoev v taezhnykh shelkopryadnikakh* [Degradation of stands in taiga silkworms]. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal* [Siberian Ecological Journal], 2002, appendix 1, pp. 3–12.
- [22] Krivolutskaya G.O. *Skrytostvolovye vrediteli v temnokhvoynykh lesakh Zapadnoy Sibiri, povrezhdennykh sibirskim shelkopryadom* [Hidden-stemmed pests in the dark coniferous forests of Western Siberia damaged by the Siberian silkworm]. Moscow–Leningrad: Nauka, 1965, 130 p.
- [23] Isaev A.S., Rozhkov A.S., Kiselev V.V. *Chernyy pikhtovyy usach Monochamus urussovi (Fisch.)* [Black fir barbel *Monochamus urussovi* (Fisch.)]. Novosibirsk: Nauka, 1988, 270 p.
- [24] Kharuk V.I., Fedotova E.V., Demidko D., Dvinskaya M.L. Spatial and temporal dynamics of Siberian silkworm large-scale outbreak in dark-needle coniferous tree stands in. *Contemporary Problems of Ecology*, 2016, v. 9 (№ 6), pp. 711–720. DOI:10.1134/S199542551606007X
- [25] Perevoznikova V.D., Baranchikov Yu.N. *Struktura zapasov nazemnoy fitomassy v svezhikh shelkopryadnikakh pikhtovoy taygi Nizhnego Priangara ya* [The structure of terrestrial phytomass reserves in fresh silkworms of the fir taiga of the Lower Angara region]. *Entomologicheskie issledovaniya v Sibiri* [Entomological studies in Siberia]. Krasnoyarsk: KF SO REO, 1999, iss. 2, pp. 87–102.
- [26] Baranchikov Yu.N., Perevoznikova V.D., Kondakov Yu.P., Kirichenko N.I. *Zoogenyy vklad v emissii ugleroda v ochagakh massovogo razmnozheniya sibirskogo shelkopryada* [Zoogenic contribution to carbon emissions in the centers of mass reproduction of the Siberian silkworm]. *Lesnye ekosistemy Eniseyskogo meridiana (issledovaniya po mezhdunarodnoy geosferno-biosfernoy programme)* [Forest ecosystems of the Yenisei meridian (research on the international geosphere-biosphere program)]. Novosibirsk: Publishing House of SB RAS, 2002, pp. 117–123.
- [27] Baranchikov Yu.N., Perevoznikova V.D. *Ochagi massovogo razmnozheniya sibirskogo shelkopryada kak istochniki dopolnitel'nogo vybrosa ugleroda* [Centers of mass reproduction of the Siberian silkworm as sources of additional carbon emission]. *Chteniya pamyati V.N. Sukacheva. KhKh. Nasekomye v lesnykh biogeotsenozakh* [Readings of memory V.N. Sukachev. XX. Insects in forest biogeocenoses]. Moscow: Comrade Scientific Publishing House of the CMC, 2004, pp. 32–53.

Acknowledgments

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of Russia for the implementation of the project «Fundamental bases of forest protection from entomo- and phytopests in Siberia» (№ FEFE-2020-0014) by the team of the scientific laboratory «Forest Protection».

The authors express their special gratitude to the Krasnoyarsk Regional Centre for Collective Use of FIC KSC SB RAS for the equipment provided to ensure the implementation of the project «Fundamental Basis of Forest Protection from Entomo- and Phytopests in Siberia» (№ FEFE-2020-0014).

Authors' information

Mokhirev Aleksandr Petrovich  — Dr. Sci. (Tech.), Lead Engineer of the Forest Protection Laboratory of the Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, ale-mokhirev@yandex.ru

Sultson Svetlana Mikhaylovna — Cand. Sci. (Agr.), Senior Researcher, Laboratory of Forest Health, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, sultson2011@yandex.ru

Mikhaylov Pavel Vladimirovich — Cand. Sci. (Agr.), Leading Researcher, Laboratory of Forest Ecosystems, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, mihaylov.p.v@mail.ru

Slinkina Olga Aleksandrovna — Engineer, Laboratory of Forest Health, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, sloa@mail.ru

Kulakova Nadezhda Nikolaevna — Cand. Sci. (Agr.), Junior Researcher, Laboratory of Forest Health, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, nadezha21@mail.ru

Kulakov Sergey Sergeevich — Cand. Sci. (Bio.), Senior Researcher, Laboratory of Forest Health, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, hbz_sibstu@mail.ru

Demidko Denis Aleksandrovich — Cand. Sci. (Bio.), Senior Researcher, Laboratory of Forest Health, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, sawer-beetle@yandex.ru

Melnichenko Natalya Pavlovna — Junior Researcher, Laboratory of Forest Health, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, natalia.melnichenko@mail.ru

Goroshko Andrey Aleksandrovich — Junior Researcher, Laboratory of Forest Health, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 902970@list.ru

Received 01.03.2023.

Approved after review 17.04.2023.

Accepted for publication 06.10.2023.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

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

The authors declare that there is no conflict of interest

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОДООХРАННЫХ ЛЕСОВ БРАТСКОГО РАЙОНА ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ

Е.М. Рунова✉, И.А. Гарус

ФГБОУ ВО «Братский государственный университет», Россия, 665709, Иркутская обл., г. Братск, ул. Макаренко, д. 40
runova0710@mail.ru

Приведена оценка современной лесоводственно-таксационной характеристики водоохранных лесов Братского водохранилища на примере территориального управления министерства лесного комплекса Иркутской области по Братскому лесничеству, а также результаты исследования насаждений на 19 пробных площадях в возрасте от 80 до 240 лет. Исследования проводились по общепринятым методикам. Установлено, что в водоохранных лесах территориального управления министерства лесного комплекса Иркутской области по Братскому лесничеству преобладают разнотравный и разнотравно-зеленомошный типы леса, занимающие соответственно 45 и 24 % от покрытой лесом площади лесничества. Преобладающим типом лесорастительных условий в лесничестве и на пробных площадях является C_2 (34,3 % от покрытой лесом площади). Насаждения произрастают по III–IV классу бонитета, полнота древостоев колеблется от 0,3 до 0,9. По результатам проведенных исследований на пробных площадях установлено, что в водоохранных лесах преобладают смешанные сосново-лиственничные древостои, средний возраст которых составляет около 160 лет. Средний диаметр сосны и лиственницы составляет соответственно 31,6 и 30,0 см, средняя высота — 22,63 и 23,05 м, что соответствует IV классу бонитета для сосны и III классу бонитета для лиственницы. Запас на пробных площадях колеблется от 140 до 380 м³/га в зависимости от полноты древостоев, которые колеблются от 0,3 до 0,6. Установлено, что на 16 пробных площадях (84,2 % от общего количества пробных площадей) имеется жизнеспособный подрост хвойных пород — сосны, лиственницы, ели, что обеспечивает естественное возобновление лесов целевыми древесными породами. По основным таксационным показателям и процессам лесовозобновления древостои на пробных площадях могут выполнять защитные функции не только в настоящее, но и в будущем.

Ключевые слова: водоохранные леса, Братское водохранилище, сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.), пробные площади, таксационная характеристика

Ссылка для цитирования: Рунова Е.М., Гарус И.А. Современное состояние водоохранных лесов Братского района Иркутской области // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 6. С. 31–39.
DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-31-39

Наблюдения за природоохранными функциями лесов в российской лесоводственной сфере всегда проводились регулярно и тщательно. При императоре Петре I для сохранения полноводности рек в XVIII в. были выделены запретные лесные зоны [1], в лесном законодательстве определены водоохранные леса [1, 2].

Под водоохранными лесами следует понимать территории, которые примыкают к береговой линии морей, рек, ручьев, каналов, озер и водохранилищ [3–14]. В связи с изменениями климата водоохранные леса приобретают все большее значение в области предотвращения оползней, наводнений, засух, смягчения последствий глобального потепления [15–20]. Доказано, что с возрастом леса начинают утрачивать свои водозащитные функции [16–23]. В связи с этим актуальным отнесено изучение возрастной структуры водоохранных лесов, их жизненного состояния и возможностей восстановления защитных функций [1, 7, 9, 19, 22].

Цель работы

Цель работы — определение состава водоохранных лесов вдоль Братского водохранилища, их лесоводственная и таксационная характеристика, оценка жизненного состояния спелых и перестойных прибрежных лесов.

Объект исследования

Актуальность исследований связана с некоторыми потерями защитных свойств лесов по берегам Братского водохранилища, обусловленных переходом древостоев в стадию естественной спелости, усыханием и болезнями многих возрастных деревьев, отрицательным воздействием рубок и лесных пожаров на прибрежной территории Братского водохранилища.

Научная новизна представленных материалов исследований заключается в оценке состояния водоохранных лесов в целях разработки лесоводственно обоснованных мероприятий по повышению защитных свойств лесов с учетом отсутствия в Иркутской области современных исследовательских работ по изучению состава

и структуры водоохраных лесов, их биологической устойчивости и повышения защитных функций.

Практическая значимость выполненных исследований состоит в разработке научно обоснованных мероприятий по замене отмирающих фитоценозов на молодые и устойчивые в ходе лесохозяйственных и лесоводственных мероприятий.

Объектом исследования служили насаждения вдоль береговой линии Братского водохранилища — одного из крупнейших в мире, заполнение которого произошло более 55 лет тому назад. Водный бассейн при максимальном заполнении занимает площадь 5470 км², а общая протяженность береговой линии водохранилища достигает 7400 км. Практически вся береговая линия водохранилища покрыта лесами, и их природоохранное значение огромно. На территории водоохраных лесов было заложено 19 пробных площадей. При их подборе основными условиями были возраст насаждений (от 80 до 160 лет), состав с преобладанием сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) и схожие лесорастительные условия.

Материалы и методы исследования

При закладке пробных площадей использовались общепринятые в лесном хозяйстве методы [24–26]. Размер пробных площадей при закладке составлял 0,5 га, среднее количество деревьев — не менее 200 шт. Осуществляли сплошной пересчет деревьев с указанием породы, диаметра стволов и высоты деревьев, запаса и других таксационных показателей, а также геоботанических характеристик леса.

Результаты и обсуждение

Исследования проводились в территориальном управлении министерства лесного комплекса Иркутской области по Братскому лесничеству (далее — Братского лесничества). Согласно материалам лесоустройства, проведенного в 2021–2022 гг., площадь водоохраных лесов составляет 25 179 га (1,9 % всей площади лесов Братского лесничества). В Братском лесничестве преобладают спелые и перестойные насаждения, занимающие 84,4 % лесопокрытой площади и имеющие 62 % запаса древесины. К спелым и перестойным древостоям относятся следующие (%): 91,9 — сосняков, 81,5 — ельников, 91,7 — лиственничников, 72,5 — пихтарников, 37,1 — кедровников, 53,7 — березняков, 47,6 — осинников. Средний состав спелых и перестойных древостоев лесничества 4С2Л1Е2Б1Ос. Распределение площадей водоохраных лесов по типам леса представлено на рис. 1.

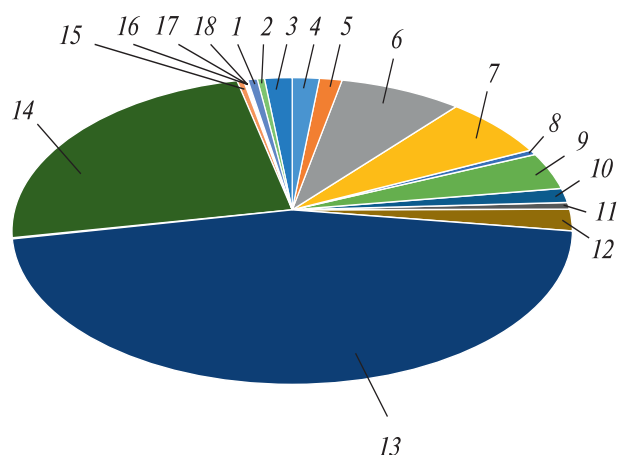


Рис. 1. Распределение площадей покрытой лесом площади Братского лесничества по типам леса: 1 — сфагновый (сф), 1%; 2 — черничный (чер), 0%; 3 — чернично-зеленомошный (чзм), 2%; 4 — брусничный (бр), 1%; 5 — багульниковый (баг), 2%; 6 — бруснично-зеленомошный (брзм), 8%; 7 — бруснично-разнотравный (бррт), 7%; 8 — гольцовый (гол), 1%; 9 — зеленомошный (зм), 4%; 10 — крупнотравный (кр), 2%; 11 — осоковый (ос), 1%; 12 — приручейный (пр), 2%; 13 — разнотравный (рт), 45%; 14 — разнотравно-зеленомошный (ртзм), 24%; 15 — зеленомошно-разнотравный (змрт), 0%; 16 — лишайниковый (лиш), 0%; 17 — ольховниковый (олх), 0%; 18 — разнотравно-осоковый (ртос), 0% (значения в диаграмме автоматически округлены до целых процентов)

Fig. 1. Distribution of forested areas of Bratsk forestry by forest types: 1 — sphagnum (sf), 1%; 2 — bilberry, 0%; 3 — bilberry-green-moss, 2%; 4 — lingonberry, 1%; 5 — bagelberry, 2%; 6 — lingonberry-pleuarcarpous-moss, 8%; 7 — lingonberry-mixed herb, 7%; 8 — alder, 1%; 9 — pleuarcarpous moss, 4%; 10 — big-grass, 2%; 11 — sedge, 1%; 12 — tame, 2%; 13 — herbaceous, 45%; 14 — herbaceous-pleuarcarpous mossy, 24%; 15 — herbaceous-pleuarcarpous-mossy-mixed-herb, 0%; 16 — lichen, 0%; 17 — alder, 0%; 18 — herb-sedge, 0% (values in the diagram are automatically approximated to even per cent)

Как видно из рис. 1, наиболее распространены разнотравный и разнотравно-зеленомошный типы леса, занимающие соответственно 45 и 24 % покрытой лесом площади в пределах Братского лесничества. Преобладающим типом лесорастительных условий в лесничестве и на пробных площадях является С₂ (34,3 % покрытой лесом площади), а также В₂. Насаждения произрастают по III–IV классам бонитета, полнота древостоев варьирует от 0,3 до 0,9.

На основании проведенных исследований определены основные таксационные характеристики древостоев на пробных площадях (табл. 1).

Как видно из табл. 1, насаждения на пробных площадях относятся к спелым и перестойным. Пробные площади относятся в основном к разнотравной группе типов леса (разнотравно-

Т а б л и ц а 1

Краткая характеристика пробных площадей

Brief characteristics of the trial plots

Номер пробной площади	Состав древо-стоя	Возраст	Тип леса	Тип лесорастительных условий	Средний диаметр ствола $D_{ср}$, см	Средняя высота дерева $H_{ср}$, м	Полнота	Запас (m^3) на 1 га,	Бонитет
1	9С1Л	80	рт	C ₂	22,3 ± 1,1 22,1 ± 0,8	18,3 ± 0,3 18,6 ± 0,8	0,5 ± 0,01	162 ± 5	III
2	8С2Л	160	бррт	C ₂	28,0 ± 2,5 26,4 ± 2,0	22,0 ± 0,6 22,6 ± 0,6	0,7 ± 0,02	291 ± 7	IV
3	4С3С3Л	150 80 110	бррт	C ₂	31,1 ± 2,6 20,6 ± 1,3 24,0 ± 1,9	23,1 ± 0,9 17,3 ± 1,1 21,4 ± 1,0	0,5 ± 0,01	208 ± 10	III
4	8С2Л	130	ртос	C ₂	26,9 ± 2,4 24,3 ± 1,9	22,0 ± 0,9 22,6 ± 1,0	0,4 ± 0,01	175 ± 11	III
5	9С1Л	180	брос	B ₂	30,3 ± 2,0 28,8 ± 1,9	22,1 ± 1,9 22,4 ± 1,1	0,4 ± 0,01	171 ± 6	IV
6	8С2Л	150	ртос	C ₂	28,3 ± 0,9 28,1 ± 1,1	23,7 ± 2,2 23,8 ± 0,7	0,5 ± 0,02	183 ± 4	IV
7	7С3Л	170	ртос	C ₂	30,9 ± 2,1 31,3 ± 3,3	23,1 ± 0,3 24,0 ± 0,5	0,5 ± 0,02	220 ± 12	III
8	8С2Л	160	рт	C ₂	29,7 ± 1,8 30,4 ± 2,0	23,3 ± 1,3 23,8 ± 1,8	0,4 ± 0,01	186 ± 3	III
9	8С2Л	190	ртос	C ₂	43,9 ± 3,0 44,0 ± 2,8	24,6 ± 0,9 25,1 ± 1,4	0,3 ± 0,01	153 ± 9	III
10	7С3Л	140	ртос	C ₂	26,4 ± 1,7 32,5 ± 1,9	23,6 ± 2,0 24,9 ± 1,5	0,9 ± 0,02	386 ± 11	III
11	8С2Л	200	ртос	C ₂	37,5 ± 2,6 32,6 ± 2,3	23,0 ± 1,0 23,5 ± 1,4	0,3 ± 0,01	140 ± 14	III
12	8С2Л	240	ртос	C ₂	40,1 ± 3,1 33,5 ± 3,1	23,4 ± 0,9 24,4 ± 0,8	0,5 ± 0,02	221 ± 15	III
13	6С4Л	100	ртос	C ₂	26,7 ± 0,9 36,2 ± 0,5	22,3 ± 1,5 25,0 ± 1,7	0,6 ± 0,02	253 ± 6	III
14	8С2Л	90	ртос	C ₂	21,9 ± 1,2 22,3 ± 1,9	21,9 ± 1,2 22,7 ± 1,8	0,7 ± 0,02	284 ± 80	III
15	7С3Л	210	ртос	C ₂	32,0 ± 3,1 29,6 ± 0,8	25,7 ± 1,3 25,0 ± 2,1	0,6 ± 0,02	263 ± 10	III
16	7С3Л	220	ртос	C ₂	40 ± 2,4 36 ± 2,0	23,2 ± 0,8 24,3 ± 1,5	0,5 ± 0,02	212 ± 12	III
17	6С4Л	230 180	ртос	C ₂	40,4 ± 1,5 24,8 ± 0,6	25,0 ± 1,7 23,9 ± 2,0	0,4 ± 0,01	181 ± 11	III
18	9С1Л	120	ртос	C ₂	35,8 ± 1,1 36,0 ± 1,4	24,7 ± 2,3 24,1 ± 2,1	0,5 ± 0,02	246 ± 9	III
19	6С4Л	110	бр	B ₂	31,7 ± 2,4 34,2 ± 2,5	21,1 ± 1,7 24,6 ± 1,3	0,9 ± 0,02	364 ± 15	IV

осоковый, бруснично-осоковый и разнотравный типы леса). Почвы на пробных площадях свежие и относительно богатые, классы бонитета III–IV, полнота в основном 0,3...0,9, запас насаждений достаточно высокий — от 140 до 380 м³/га. Подрост встречается на 16 пробных площадях. Это в основном подрост хвойных пород — сосны, ели, лиственницы. Высота подраста 1,5...2,0 м, численность подраста 2...5 тыс. шт./га; подрост жизнеспособный.

На пробной площади № 7 формируется подрост лиственных пород — березы и осины, высотой 2 м, численностью 2...3 тыс. шт./га. На пробных площадях № 3 и № 17 подрост отсутствует. В подлеске встречаются рябина, шиповник. Подлесок редкий, неравномерный.

В живом напочвенном покрове преобладают следующие растения:

грушанка круглолистная (*Pirola rotundifolia* L.);
линея северная (*Linna borealis* L.);

Таблица 2

Средние таксационные показатели сосны на пробных площадях

Average taxation indices of pine trees in the trial plots

Номер пробной площади	Возраст, лет	Средний диаметр ствола на высоте 1,3 м от поверхности земли $D_{1,3}$, см	Средняя высота H , м	Средний запас древесины, м ³ /га
1	80	22	18	144
2	160	26	22	232
3	150	31	23	140
4	130	27	22	136
5	180	30	22	153
6	150	28	23	144
7	170	30	24	154
8	160	30	23	144
9	190	44	25	120
10	140	26	25	266
11	200	32	23	112
12	240	32	24	132
13	100	36	25	150
14	90	22	22	224
15	210	30	25	182
16	220	36	24	147
17	230	24	23	108
18	120	36	24	216
19	110	34	24	204
Среднее значение	160	31,36	22,63	163,57

Таблица 3

Таксационная характеристика лиственницы на пробных площадях

Taxation characteristics of larch on trial plots

Номер пробной площади	Возраст, лет	Средний диаметр ствола на высоте 1,3 м от поверхности земли $D_{1,3}$, см	Средняя высота H , м	Средний запас древесины, м ³ /га
1	80	22	18	16
2	160	26	22	38
3	150	24	21	60
4	130	24	22	34
5	180	28	22	17
6	150	28	23	36
7	170	30	24	66
8	160	30	23	36
9	190	44	25	30
10	140	32	24	114
11	200	32	23	28
12	240	32	24	44
13	100	36	25	100
14	90	22	22	56
15	210	30	25	63
16	220	36	24	53
17	230	24	23	72
18	120	36	24	24
19	110	34	24	144
Среднее значение	160	30	23,05	55,31

башмачки — настоящий (*Cipripedium calceolus* L.), пятнистый (*Cipripedium gittatum* L.), крупноцветный (*Cipripedium macranthum* L.);

герань ложносибирская (*Geranium pseudo-sibiricum* J. Mayer.);

фиалка одноцветковая (*Viola uniflora*);

кровохлебка (*Sanquisorba officinalis* L.);

костяника (*Rubus saxatilis*);

зеленые мхи: *Hylocomium splendens*, *Pleurozium schreberi*;

виды рода *Dicranum*;

с небольшим покрытием, но относительно часто встречается *Polytrichum commune*;

костяника (*Rubus saxatilis*).

Иногда на пробных площадях в живом напочвенном покрове встречаются вейники (*Calamagrostis canescens*, *C. purpurea* s.l.), осока большехвостая (*Carex macroura* Meinsh.), осока стоповидная (*Carex pediformis* С.А. Мей.) и лесные злаки. Разнотравная группа типов леса характерна для светлохвойных и мягколиственных лесов, растущих на пологих склонах световых экспозиций. Почвы в разнотравной группе типов леса варьируют по своему механическому составу и степени ув-

лажнения. Существенным минусом данной группы является то, что недостаток влаги в почвенном слое и наличие сухостойной травы с весенне-летний период могут способствовать возникновению пожаров. Состав насаждений с преобладанием сосны 4...10 единиц состава, лиственница занимает по составу 1...4 единицы, единично встречаются береза, осина. Поскольку наибольший запас древесины на пробных площадях имеют сосна и лиственница, были определены средние таксационные показатели этих пород в зависимости от возраста для выявления связей между показателями и проведено округление основных таксационных показателей до целых значений (табл. 2, 3).

Как видно из табл. 2, сосна в возрасте более 160 лет отличается высокими таксационными показателями: средний диаметр ствола составляет 31,36 см, средняя высота дерева — 22,63 м, средний запас древесины в насаждениях — 163,57 м³. Запас древесины в большей степени зависит от полноты насаждений, чем от возраста. На рис. 2 и 3 представлены зависимости диаметра ствола сосны от возраста и взаимосвязь диаметра ствола и высоты деревьев сосны.

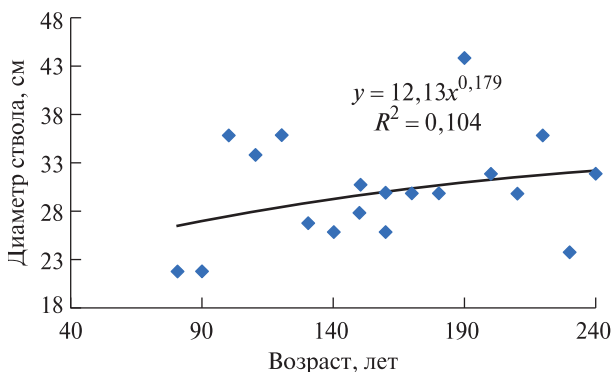


Рис. 2. Зависимость среднего диаметра сосновой части насаждений от возраста

Fig. 2. Dependence of the pines average diameter on age

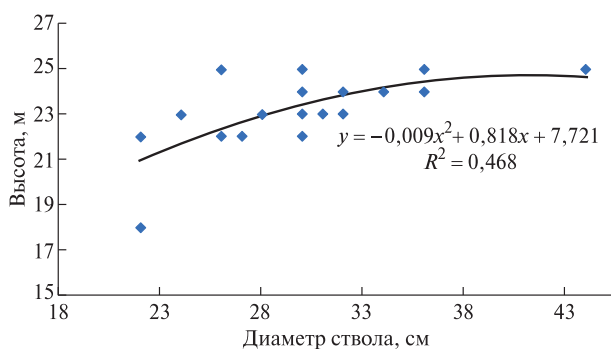


Рис. 3. Зависимость диаметра ствола сосновой части насаждений от высоты дерева

Fig. 3. Dependence of pine trunk diameter on tree height

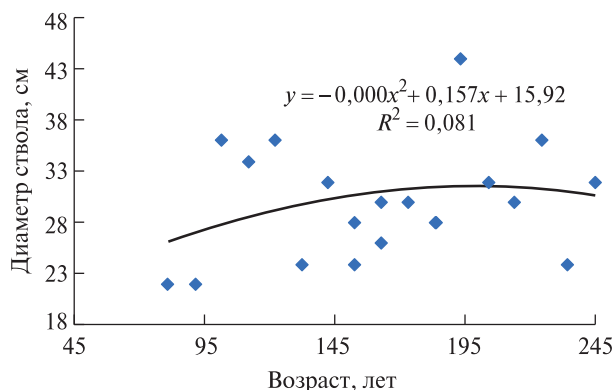


Рис. 4. Зависимость среднего диаметра ствола лиственничной части насаждений от возраста

Fig. 4. Dependence of larch average trunk diameter on age

Как видно из рис. 2, нет тесной связи между средним диаметром и возрастом ($R^2 = 0,104$).

На рис. 3 показано, что взаимосвязь диаметра и высоты деревьев сосны отличается невысоким коэффициентом детерминации ($R^2 = 0,468$), после возраста спелости наблюдается некоторое снижение средней высоты деревьев сосны, что связано с процессом вступления в естественную спелость древостоя и началом его распада.

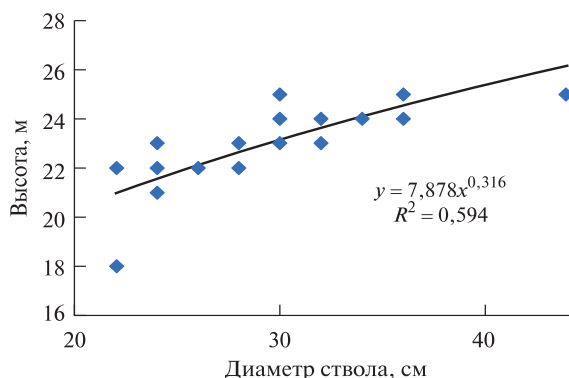


Рис. 5. Зависимость диаметра ствола лиственничной части насаждений от высоты

Fig. 5. Dependence of larch trunk diameter on height

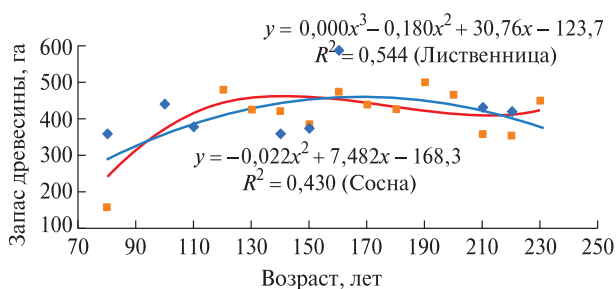


Рис. 6. Зависимость продуктивности сосны и лиственницы по запасу древесины от возраста водоохранных насаждений на пробных площадях

Fig. 6. Dependence of pine and larch wood stock productivity on age of water conservation plantations in trial plots

Как видно из табл. 3, лиственница в возрасте более 160 лет отличается высокими таксационными показателями: средний диаметр ствола составляет 30 см, средняя высота дерева — 23 м, средний запас древесины в насаждении — 55,31 м³. По составу сосна занимает 1...4 единицы, т. е. не является преобладающей породой.

На рис. 4 и 5 представлены зависимость диаметра ствола лиственницы от возраста и взаимосвязь диаметра и высоты деревьев лиственницы.

Из рис. 4 видно отсутствие тесной связи между средним диаметром ствола и возрастом ($R^2 = 0,081$). По рис. 4, 5 можно сделать вывод, что по среднему диаметру ствола сосна и лиственница практически равноценны, у деревьев лиственницы наблюдается большая средняя высота по сравнению с сосновой частью древостоев на пробных площадях.

Сравнить продуктивность каждого элемента леса по запасу древесины сложно, поскольку насаждения отличаются по полноте (от 0,9 до 0,3) и доле участия в общем запасе древесины в насаждении. В целях сопоставления продуктивности сосновой и лиственничной части насаждений показатели запаса древесины были приведены к полноте 1,0 и 100 % по запасу, что используется при составлении таблиц хода роста (рис. 6).

Следует отметить, что снижение полноты и запаса древостоев является естественным процессом. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что исследованные насаждения вдоль береговой линии Братского водохранилища представлены в основном перестойными насаждениями. В Иркутской области были разрешены сплошные и выборочные санитарные рубки в водоохранных лесах. Участки вырубок в настоящей работе не приведены, так как основная задача состояла в установлении лесоводственно-таксационных характеристик естественных, не затронутых антропогенным воздействием лесов. В современной литературе практически нет сведений о лесоводственно-таксационных характеристиках лесов Иркутской области, выполняющих водоохранные функции, за исключением труда А.В. Побединского [27].

Выводы

1. В водоохранных лесах Братского лесничества преобладают спелые и перестойные насаждения, занимающие 84,4 % лесопокрытой площади и имеющие 62 % запаса древесины. К спелым и перестойным древостоям относятся 91,9 % сосняков.

2. На пробных площадях расположены спелые и перестойные насаждения. Лесные массивы относятся в основном к разнотравной группе типов леса, класс бонитета III–IV, преобладающая полнота 0,3...0,9; запас древесины в насаждениях достаточно высокий — от 140 до 380 м³/га. Сосна в возрасте более 160 лет отличается высокими таксационными показателями: средний диаметр ствола составляет 31,36 см, средняя высота дерева — 22,63 м, средний запас древесины в насаждении — 141,78 м³. По составу сосна занимает 8...10 единиц, т. е. является преобладающей породой.

3. Лиственница в возрасте более 160 лет отличается высокими таксационными показателями: средний диаметр ствола составляет 30 см, средняя высота дерева — 23,05; лиственница занимает 2...4 единицы в составе насаждений.

4. В перестойных насаждениях наблюдается снижение средней высоты деревьев сосны и лиственницы, что связано с процессом вступления в естественную спелость древостоя и началом его распада. Графики хода роста запасов водоохранных лесов по сосне и лиственнице, показывают, что после 120 лет, запас практически не увеличивается, после 230 лет наблюдается тенденция к снижению запаса насаждений.

5. По основным таксационным показателям древостои на пробных площадях могут выполнять защитные функции (насаждения, смешанные

по составу с наличием подроста, часто двухъярусные, имеющие достаточное биологическое разнообразие). Однако для полной оценки водоохранных свойств лесов необходимо комплексное исследование санитарного состояния насаждений, успешности естественного возобновления, оценки влияния крупных деревьев на абразию береговой линии водохранилищ, накопления сухостоя при возрасте естественной спелости лесов.

Список литературы

- [1] Леман В., Кобяков К., Винников А. Защитные леса и сохранение водных биологических ресурсов // Устойчивое лесопользование, 2018. № 1 (53). С. 2–10.
- [2] Минлебаев Г. Влияние лесов на полноводность рек // ЛесПромИнформ, 2011. № 6 (80). С. 44–48.
- [3] Водный кодекс Российской Федерации от 03.06.2006 N 74-ФЗ (ред. от 01.05.2022). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_60683/ (дата обращения 12.03.2023).
- [4] Лесной кодекс Российской Федерации от 04.12.2006 № 200-ФЗ (ред. от 29.12.2022). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299/ (дата обращения 12.03.2023).
- [5] Особенности использования, охраны, защиты, воспроизводства лесов, расположенных в водоохранных зонах, лесов, выполняющих функции защиты природных и иных объектов, ценных лесов, а также лесов, расположенных на особо защитных участках лесов. Утверждены приказом Рослесхоза от 14.12.2010 № 485. URL: <https://meganorm.ru/Index1/60/60047.htm> (дата обращения 12.03.2023).
- [6] Мустафин Р.Ф. Водоохранная и почвозащитная роль лесов Южного Урала на территории Республики Башкортостан: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Уфа, 2017, 40 с.
- [7] Рубцов Н.В. Защитно-водоохранные леса. М.: Лесная пром-сть, 1972. 227 с.
- [8] Толкач О.В. Водорегулирующая и поллютантно-депонирующая роль лесов. Автореф. дис. ... д. с.-х. н. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2015. 38 с.
- [9] Водоохранные-защитные леса Уфимского плато. Экология, синтаксономия и природоохранная значимость / под ред. А.Ю. Кулагина. Уфа: Гилем, 2007. 448 с.
- [10] Идзон П.Ф., Пиненова Г.С., Цыганова О.П., Вирин А.А. Влияние леса на водные ресурсы. М.: Наука, 1986. 168 с.
- [11] Кожевникова Н.К. Динамика гидрологических и защитных функций горных лесов Южного Сихотэ-Алиня в процессе послерубочных восстановительных сукцессий: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Владивосток, Изд-во Биолого-почвенного института ДВО РАН, 2010. 20 с.
- [12] Мартыанов Н.А., Баталов А.А., Кулагин А.Ю., Кужлева Н.Г. Водоохранные-защитные леса Уфимского плато: флороценологическое своеобразие и охрана // Геоэкология в Урало-Каспийском регионе: Тезисы докл. Междунар. науч.-практ. конф. Ч. 2. Уфа: Гилем, 1996. 448 с.
- [13] Молчанов А.А. Гидрологическая роль леса. М.: АН СССР, 1960. 487 с.
- [14] Онучин А.А. Влагооборот горных лесов Сибири (локальные региональные особенности): автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Красноярск: Изд-во Биолого-почвенного института ДВО РАН, 2003. 40 с.
- [15] Кобяков К.Н., Лепешкин Е.А., Титова С.В. Защитные леса: получится ли их сохранить? // Устойчивое лесопользование, 2013. № 1 (34). С. 34–44.

- [16] Минлебаев Г. Влияние лесов на полноводность рек // ЛесПромИнформ, 2011. № 6 (80). С. 44–48.
- [17] Никифоров А.И., Мухлынин Д.Н., Абатурова В.А. Прибрежные нерестоохранные леса в России современные проблемы права и практики // Аграрное и земельное право, 2020. № 4(184). С. 42–47.
- [18] Рыжков И.Б., Мустафин Р.Ф., Арсланов А.А. Об учете растительности при оценке устойчивости склонов // Уральский регион Республики Башкортостан: Человек, природа, общество: региональная науч.-практ. конф., Сибай, 11 ноября 2010 г. Сибай: Издательство ГУП РБ «Сибайская городская типография», 2010. С. 324–326.
- [19] Мустафин Р.Ф., Хайретдинов А.Ф. Водоохранные леса вдоль малых озер и водохранилищ их экологическая роль // Актуальные проблемы лесного комплекса, 2016. № 44. С. 127–131.
- [20] Бебия С.М. Лесные ресурсы Черноморского побережья Кавказа: проблемы и перспективы их рационального использования // Сибирский лесной журнал, 2015. № 1. С. 9–24.
- [21] Семечкин И.В. Динамика возрастной структуры древостоев и методы ее изучения // Вопросы лесоведения, Т. 1. Красноярск: ИЛиД, 1970. С. 422–445.
- [22] Арсланов А.А. Влияние древесно-кустарниковой растительности на устойчивость склонов: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Уфа, БГАУ, 2015. 23 с.
- [23] Хайретдинов А.Ф., Рамазанова Г.З., Джамаев М.Н., Мустафин Р.Ф. Исследование корневой системы сосны и ели на склонах в условиях горной местности Белорецкого района Республики Башкортостан // Аграрная наука сельскому хозяйству. Сб. статей в 3 кн. Кн. 2. Барнаул: Изд-во Алтайского ГАУ, 2016. С. 407–408.
- [24] ОСТ 56-69-83. Площади пробные лесоустроительные. Метод закладки. Издание официальное. Утв. приказом (распоряжением) Госкомитета СССР по лесн. хоз-ву от 23 мая 1983 г. № 72. М.: Издательство стандартов, 1983. 60 с.
- [25] Рунова Е.М., Базыльников И.В. Лесопатологическое состояние лесов Иркутской области // Актуальные проблемы лесного комплекса / под ред. Е.А. Памфилова. Брянск: Изд-во БГИТУ, 2020. № 56. С. 79–83.
- [26] Рунова Е.М., Гарус И.А., Гнатишина Д.М., Орлова Ю.В. Определение санитарного состояния водоохранных лесов Братского водохранилища // Актуальные проблемы лесного комплекса, 2021. № 59. С. 176–179.
- [27] Побединский А.В. Водоохранная и почвозащитная роль лесов. Пушкино: Изд-во ВНИИЛМ, 2013. 208 с.

Сведения об авторах

Рунова Елена Михайловна [✉] — д-р с.-х. наук, профессор кафедры воспроизводства и переработки лесных ресурсов, ФГБОУ ВО «Братский государственный университет», runova0710@mail.ru

Гарус Иван Александрович — канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой воспроизводства и переработки лесных ресурсов, ФГБОУ ВО «Братский государственный университет», ivan-garus@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.02.2023.

Одобрено после рецензирования 10.05.2023.

Принята к публикации 23.08.2023.

CURRENT STATE OF WATER CONSERVATION FORESTS IN BRATSK DISTRICT (IRKUTSK REGION)

E.M. Runova✉, I.A. Garus

Bratsk State University, 40, Makarenko st., 665709, Bratsk, Irkutsk reg., Russia

runova0710@mail.ru

The assessment of the modern forestry taxation characteristics of the water conservation forests for the Bratsk water reservoir is given. The results of the forest taxational characteristics of water conservation forests of the Ministry of Forestry territorial administration in the Irkutsk region for Bratsk forestry, as well as the results of a study of plantings on 19 trial plots aged 80 to 240 years are presented. The research was carried out according to generally accepted methods. It has been established that in the water conservation forests of the Ministry of Forestry territorial administration in the Irkutsk region for Bratsk forestry, mixed-herbs and mixed-herbs-pleucarpous moss types of forest are predominant and occupy 45 and 24 % of the forested area respectively. The predominant type of forest growing conditions in forestry and on trial plots is C₂ (34,3 % of the forested area). Plantations grow in III–IV class of bonitet, the stands normality ranges from 0,3 to 0,9. It was found that on 16 trial plots (84,2 % of the total number of test areas) there is a viable undergrowth of coniferous species such as pine, larch, spruce, which provides natural forest regeneration with target tree species. According to the main taxation indicators and the processes of reforestation, stands on trial plots can perform protective functions not only at present, but also in the future.

Keywords: water conservation forests, Bratsk water reservoir, Scots pine, Siberian larch, trial plots, taxation characteristic

Suggested citation: Runova E.M., Garus I.A. *Sovremennoe sostoyanie vodookhrannykh lesov bratskogo rayona Irkutskoj oblasti* [Current state of water conservation forests in Bratsk district (Irkutsk region)]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 6, pp. 31–39. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-31-39

References

- [1] Leman V., Kobayakov K., Vinnikov A. *Zashchitnye lesa i sokhraneniye vodnykh biologicheskikh resursov* [Protective forests and conservation of aquatic biological resources]. *Ustoychivoe lesopol'zovanie* [Sustainable forest management], 2018, no. 1 (53), pp. 2–10.
- [2] Minlebaev G. *Vliyaniye lesov na polnovodnost' rek* [Influence of forests on the full flow of rivers]. *LesPromInform*, 2011, no. 6 (80), pp. 44–48.
- [3] *Vodnyy kodeks Rossiyskoy Federatsii ot 03.06.2006 N 74-FZ (red. ot 01.05.2022)* [Water Code of the Russian Federation of 03.06.2006 N 74-FZ (as amended on 01.05.2022)]. Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_60683/ (accessed 12.03.2023).
- [4] *Lesnoy kodeks Rossiyskoy Federatsii ot 04.12.2006 N 200-FZ (red. ot 29.12.2022)* [Forest Code of the Russian Federation of December 4, 2006 N 200-FZ (as amended on December 29, 2022)]. Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299/ (accessed 12.03.2023).
- [5] *Osobennosti ispol'zovaniya, okhrany, zashchity, vosproizvodstva lesov, raspolozhennykh v vodookhrannykh zonakh, lesov, vypolnyayushchikh funktsii zashchity prirodnykh i inykh ob'ektov, tsennykh lesov, a takzhe lesov, raspolozhennykh na osobo zashchitnykh uchastkakh lesov. Utverzhdeny prikazom Rosleskhoza ot 14.12.2010 № 485* [Features of the use, protection, reproduction of forests located in water protection zones, forests that perform the functions of protecting natural and other objects, valuable forests, as well as forests located in especially protective forest areas. Approved by order of Rosleskhoz no. 485 dated December 14, 2010]. Available at: <https://meganorm.ru/Index1/60/60047.htm> (accessed 12.03.2023).
- [6] Mustafin R.F. *Vodookhrannaya i pochvozashchitnaya rol' lesov Yuzhnogo Urala na territorii Respubliki Bashkortostan* [Water-protective and soil-protective role of the forests of the Southern Urals on the territory of the Republic of Bashkortostan]. *Dis. Dr. Sci. (Agric.)*. Ufa, 2017, 40 p.
- [7] Rubtsov N.V. *Zashchitno-vodookhrannyye lesa* [Protective water forests]. Moscow: *Lesnaya promyshlennost'*, 1972, 227 p.
- [8] Tolkach O.V. *Vodoreguliruyushchaya i pollyutantno-deponiruyushchaya rol' lesov* [Water-regulating and pollutant-depositing role of forests]. *Dis. Dr. Sci. (Agric.)*. Ekaterinburg: UGLTU, 2015, 38 p.
- [9] *Vodookhranno-zashchitnye lesa Ufmskogo plato. Ekologiya, sintaksonomiya i prirodookhrannaya znachimost'* [Water protection forests of the Ufa plateau. Ecology, syntaxonomy and environmental significance]. Ed. A.Yu. Kulagin. Ufa: Guilem, 2007, 448 p.
- [10] Idzon P.F., Pinenova G.S., Tsyganova O.P., Virin A.A. *Vliyaniye lesa na vodnye resursy* [Influence of the forest on water resources]. Moscow: Nauka, 1986, 168 p.
- [11] Kozhevnikova N.K. *Dinamika gidrologicheskikh i zashchitnykh funktsiy gornykh lesov Yuzhnogo Sikhote-Alinya v protsesse poslerubochnykh vosstanovitel'nykh suksessiy* [Dynamics of hydrological and protective functions of the Southern Sikhote-Alin mountain forests in the process of post-cutting restoration successions]. *Dis. Cand. Sci. (Biol.)*. Vladivostok: Biol.-soil. in-t FEB RAN, 2010, 20 p.
- [12] Mart'yanov N.A., Batalov A.A., Kulagin A.Yu., Kuzhleva N.G. *Vodookhranno-zashchitnye lesa Ufmskogo plato: florasentnoticheskoe svoeobrazie i okhrana* [Water-protective forests of the Ufa Plateau: Florocenotic originality and protection]. *Geoekologiya v Uralo-Kaspiyskom regione* [Geoecology in the Ural-Caspian region: Abstracts of reports. int. Scientific and Practical Conf. Part 2]. Ufa: Gilem, 1996, 448 p.
- [13] Molchanov A.A. *Gidrologicheskaya rol' lesa* [The hydrological role of the forest]. Moscow: AN SSSR, 1960, 487 p.
- [14] Onuchin A.A. *Vlagooborot gornykh lesov Sibiri (lokal'nye regional'nye osobennosti)* [Moisture turnover of Siberian mountain forests (local regional features)]. *Dis. Dr. Sci. (Biol.)*. Krasnoyarsk: Biol.-soil. Institute of Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 2003, 40 p.

- [15] Kobayakov K.N., Lepeshkin E.A., Titova S.V. *Zashchitnye lesa: poluchitsya li ikh sokhranit'?* [Protective forests: can they be saved?]. *Ustoychivoe lesopol'zovanie* [Sustainable forest management], 2013, no. 1 (34), pp. 34–44.
- [16] Minlebaev G. *Vliyaniye lesov na polnovodnost' rek* [Influence of forests on the full flow of rivers]. *LesPromInform*, 2011, no. 6 (80), pp. 44–48.
- [17] Nikiforov A.I., Mukhlynin D.N., Abaturova V.A. *Pribrezhnyye nerestookhrannyye lesa v Rossii sovremennyye problemy prava i praktiki* [Coastal spawning forests in Russia modern problems of law and practice]. *Agrarnoe i zemel'noye pravo* [Agrarian and land law], 2020, no. 4(184), pp. 42–47.
- [18] Ryzhkov I.B., Mustafin R.F., Arslanov A.A. *Ob uchete rastitel'nosti pri otsenke ustoychivosti sklonov* [On accounting for vegetation when assessing slope stability]. *Ural'skiy Region Respubliki Bashkortostan: Chelovek, priroda, obshchestvo: regional'naya nauchno-prakticheskaya konferentsiya* [Ural Region of the Republic of Bashkortostan: Man, Nature, Society: Regional Scientific and Practical Conference], Sibay, November 11, 2010. Sibay: Publishing House of the State Unitary Enterprise of the Republic of Belarus «Sibay City Printing House», 2010, pp. 324–326.
- [19] Mustafin R.F., Khayretdinov A.F. *Vodookhrannyye lesa vdol' malyykh ozer i vodokhranilishch ikh ekologicheskaya rol'* [Water protection forests along small lakes and reservoirs and their ecological role]. *Aktual'nyye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex], 2016, no. 44, pp. 127–131.
- [20] Bebiya S.M. *Lesnye resursy Chernomorskogo poberezh'ya Kavkaza: problemy i perspektivy ikh ratsional'nogo ispol'zovaniya* [Forest resources of the Black Sea coast of the Caucasus: problems and prospects for their rational use]. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* [Siberian Forestry Journal], 2015, no. 1, pp. 9–24.
- [21] Semechkin I.V. *Dinamika vozrastnoy struktury drevostoev i metody ee izucheniya* [Dynamics of the age structure of forest stands and methods of its study]. *Voprosy lesovedeniya* [Problems of Forest Science], v. 1. Krasnoyarsk: ILiD, 1970, pp. 422–445.
- [22] Arslanov A.A. *Vliyaniye drevesno-kustarnikovoy rastitel'nosti na ustoychivost' sklonov* [Influence of tree and shrub vegetation on the stability of slopes]. *Dis. Cand. Sci. (Agric.)*. Ufa: BSAU, 2015, 23 p.
- [23] Khayretdinov A.F., Ramazanova G.Z., Dzhamayev M.N., Mustafin R.F. *Issledovanie kornevoy sistemy sosny i eli na sklonakh v usloviyakh gornoy mestnosti Beloretskogo rayona Respubliki Bashkortostan* [Study of the root system of pine and spruce on the slopes in the mountainous terrain of the Beloretsk region of the Republic of Bashkortostan]. *Agrarnaya nauka sel'skomu khozyaystvu. Sbornik statey v 3 knigakh. Kn. 2* [Agrarian science for agriculture. Collection of articles in 3 books. Volume 2]. Barnaul: Altai State Agrarian University, 2016, pp. 407–408.
- [24] OST 56-69-83 *Ploshchadi probnyye lesoustroitel'nyye. Metod zakladki. Izdanie ofitsial'noe. Utv. prikazom (rasporyazheniem) Goskomiteta SSSR po lesn. khoz-vu ot 23 maya 1983 g. № 72* [Trial forest inventory areas. bookmark method. Official edition. Approved by order (instruction) of the USSR State Committee for Forestry. household of May 23, 1983 No. 72]. Moscow: Publishing House of Standards, 1983, 60 p.
- [25] Runova E.M., Bazyl'nikov I.V. *Lesopatologicheskoye sostoyaniye lesov Irkutskoy oblasti* [Forest pathological state of the forests of the Irkutsk region]. *Aktual'nyye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex]. Ed. E.A. Pamfilova. Bryansk: BGITU, 2020, no. 56, pp. 79–83.
- [26] Runova E.M., Garus I.A., Gnatishina D.M., Orlova Yu.V. *Opreделение sanitarnogo sostoyaniya vodookhrannykh lesov Bratskogo vodokhranilishcha* [Determination of the sanitary condition of water protection forests of the Bratsk reservoir]. *Aktual'nyye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex], 2021, no. 59, pp. 176–179.
- [27] Pobedinskiy A.V. *Vodookhrannaya i pochvozashchitnaya rol' lesov* [Water protection and soil protection role of forests]. Pushkino: VNIILM, 2013, 208 p.

Authors' information

Runova Elena Mikhaylovna  — Dr. Sci. (Agriculture), Professor of the Department of Reproduction and Processing of Forest Resources of the Bratsk State University, runova0710@mail.ru

Garus Ivan Aleksandrovich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Department of Reproduction and Processing of Forest Resources of the Bratsk State University, ivan-garus@yandex.ru

Received 08.02.2023.

Approved after review 10.05.2023.

Accepted for publication 23.08.2023.

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

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ДЕТСКИХ ПЛОЩАДОК ДЛЯ ДЕТЕЙ С ОГРАНИЧЕННЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ

В.В. Кругляк¹✉, Н.П. Карташова²

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», 394087, г. Воронеж,
ул. Мичурина, д. 1

²ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», 394087, г. Воронеж,
ул. Тимирязева, д. 8

kruglyak_vl@mail.ru

Рассмотрена проблема формирования окружающего пространства без барьеров для детей с ограниченными возможностями. Проанализированы направления современного опыта проектирования, определяющие создание равноценных условий для жизнедеятельности детей-инвалидов и здоровых детей. Представлены результаты исследования аспектов проектирования доступной среды для детей с ограниченными возможностями и условий, определяющих и обосновывающих использование специального оборудования. Разработана классификация условий целесообразного проектирования специальных средств для устранения архитектурно-строительных барьеров. Предложено применение принципов универсального дизайна детских площадок с позиций пространственной, полисенсорной и смысловой доступности.

Ключевые слова: детская площадка, дети с ограниченными возможностями, озеленение и благоустройство

Ссылка для цитирования: Кругляк В.В., Карташова Н.П. Особенности формирования детских площадок для детей с ограниченными возможностями // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 6. С. 40–55.
DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-40-55

В 2000–2020-е годы поступает информация об увеличении числа детей с ограниченными возможностями. Более 1 млрд людей в мире, или около 15 % мирового населения, имеют ту или иную форму инвалидности. Об этом сообщает Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ). По данным 2022 г., в России проживает 10,2 млн чел. с инвалидностью, это 8,8 % всего населения России. Из них 720 тыс. — дети, которые составляют 2,4 % всего детского населения, проживающего в нашей стране. В Воронежской области проживает 8,3 тыс. детей инвалидов — это 2 % от общей численности детей. Поэтому необходимо для них создать такие условия жизнедеятельности, которые способствовали бы развитию, нормальному общению с другими детьми, не имеющими ограничений по здоровью. Для этого среда должна стать более «доступной». Основное внимание важно уделить изменению построения пространства без барьеров, препятствующих полноценному участию в общественной жизни детей с ограниченными возможностями [1]. Однако доступность окружающей среды не делает ее инклюзивной, т. е. обеспечивающей доступность возможностей вне зависимости от особенностей человека. «Игровая площадка» — означает создание среды, в которой все дети имеют равный доступ и возможность участия в физических и социальных играх [2]. Таким образом, нацеленность

на инклюзию как на область вмешательства, а не только на доступность, предлагается как более комплексный подход.

Цель работы

Цель работы — разработка концепции создания детских инклюзивных игровых площадок с учетом пользования детьми с ограниченными возможностями, систематизация информации о функционировании игровых площадок для детей с ограниченными возможностями, выявление связанных с ним проблем и предложение возможных путей решения, а также рассмотрение проблемы недостатка детских площадок для детей с ограниченными возможностями в пределах различных объектов ландшафтной архитектуры на примере города Воронежа.

Объекты и методы исследования

Детская игровая площадка, как и любой архитектурный объект, при проектировании требует комплексного учета множества факторов и прежде всего учебно-воспитательного, оздоровительного, санитарно-гигиенического и эстетического. В частности, к ним относятся возрастное деление игрового пространства, многообразие видов игровой деятельности, физическая и психологическая безопасность пребывания, размещение игровых элементов в благоприятных условиях с обеспечением игровых возможностей, правильное применение конструкций и материалов [3].

Недостаток детских площадок на объектах ландшафтной архитектуры со специальным оборудованием для детей с ограниченными возможностями негативно характеризует устройство городских объектов. В связи с этим возникла необходимость создания инклюзивных детских площадок, которые бы предоставляли возможность детям с инвалидностью социализироваться и развиваться наравне с другими сверстниками свой социальный, психический и физический потенциал. Опыт реализации принципа создания инклюзивных игровых площадок в России позволяет обозначить часть проблем и предложить пути их решения.

Объектами данного исследования служили детские игровые площадки в парках разных районов города Воронежа: «Алые паруса» в Левобережном районе, «Танаис» в Советском районе, «Дельфин» в Железнодорожном районе, парк им. Дурова в Ленинском районе, «Орленок» в Центральном районе и парк «Роща Сердца» в Коминтерновском районе. Эти объекты являются наиболее значимыми в городе для отдыха населения не только близлежащих жилых районов, но и всего города. Перечисленные парки расположены вблизи торговых центров, детских поликлиник и школ, что повышает их посещаемость родителями вместе с детьми (рис. 1). На наш взгляд, именно такие детские площадки наиболее подходят для размещения в их пределах инклюзивных игровых пространств.

Парк «Алые Паруса» расположен по адресу ул. Мопра, 16 и имеет общую площадь 6,2 га. Он был создан в 1975 г., а в 2011 г. реконструирован (рис. 2, 3).

Парк «Орленок» расположен по адресу: ул. Фридриха Энгельса, 9. Площадь парка составляет 4,9 га (рис. 4). До 1917 г. на этой территории находился плац Михайловского кадетского корпуса, а после 1917 г. — площадь III Интернационала. Реконструкции парка проводились в 2019–2022 гг.

Парк «Дельфин» расположен по адресу: ул. Остужева, 2в. Площадь парка — 5,7 га (рис. 5, 6). Ко дню защиты детей 1 июня 1975 г., прошла церемония открытия нового парка «Дельфин». Период реконструкции 2020–2022 гг.

Парк «Танаис» расположен по адресу: ул. Олеко Дундича, 2. Площадь природной зоны, в пределах которой находится парк «Танаис», составляет 24 га (рис. 7). Парк был открыт в 1974 г., и с тех пор ежегодно привлекает все новых посетителей. В 2011 г. выполнено обновление аттракционов, облагорожена зона отдыха, однако в 2020 г. аттракционы демонтировали, поскольку решением местного суда их строительство в парке признали незаконным. В ходе будущей реконструкции на территории появятся новые объекты для развлечения детей.

Парк «Роща Сердца» расположен по адресу: ул. Маршала Жукова, 12в. Общая площадь парка составляет 1,8 га. Парк появился в 2010 г. к 425-летию города Воронежа. На территории парка высажены 142 дерева: липы, платаны, клены и др. На момент открытия были установлены малые архитектурные формы.

В Коминтерновском р-не вблизи торгово-развлекательного центра «Арена» по адресу: Воронеж, ул. Бульвар Победы, 23б, расположен парк Победы общей площадью 8 га. Парк разбит на несколько зон: зеленую зону для прогулок, спортивную, парк детских аттракционов «Чайлэнд». Уникальной составляющей парка является колесо обозрения. Озеленение территории парка представлено разнообразным ассортиментом древесной и кустарниковой растительности, в частности, из деревьев это катальпа бигнониевидная (*Catalpa bignonioides* Walt), липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill) и клен серебристый (*Acer saccharinum* L.), из кустарников — чубушник венечный (*Philadelphus coronarius* L.) и кизильник блестящий (*Cotoneaster lucidus* Schlecht) в виде живой изгороди. Встречаются лиственница сибирская (*Larix sibirica* L.), клен остролистный (*Acer platanoides* L.), рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia* L.), сирень обыкновенная (*Syringa vulgaris* L.), акация белая (*Robinia pseudoacacia* L.), береза повислая (*Betula pendula* Roth), ель колочая (*Picea pungens* L.). Единично, в количестве 1–3 экз. встречаются ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior* L.), тополь черный (*Populus nigra* L.), можжевельник казацкий (*Juniperus sabina* L.), калина красная (*Viburnum opulus* L.), яблоня домашняя (*Malus domestica* Mill), дуб черешчатый (*Quercus robur* L.) [4]. Дорожки, вымощенные тротуарной плиткой в сочетании с кованым мостиком и беседкой являются популярным местом для свадебных церемоний. Спортивная часть парка включает в себя площадку для мини-футбола, современную баскетбольную площадку, крытую площадку для занятия йогой и гимнастикой, прокат электросамокатов и велосипедов, брусня, площадку для игры в городки, турники и другие спортивные снаряды. Для посетителей парка работает комплекс аттракционов «Чайлэнд» — их насчитывается на открытом пространстве свыше 20. Они предназначены для детей любого возраста.

На территории «Парка Победы» имеется первая игровая площадка, адаптированная для детей с ограниченными возможностями, площадь которой составляет 110 м² (рис. 8, 9). Для игр установлен городок с рампами, качели для детей в инвалидной коляске и карусель. Однако в целом этого недостаточно, так как в городе насчитывается 8,3 тыс. детей с ограничениями по здоровью.

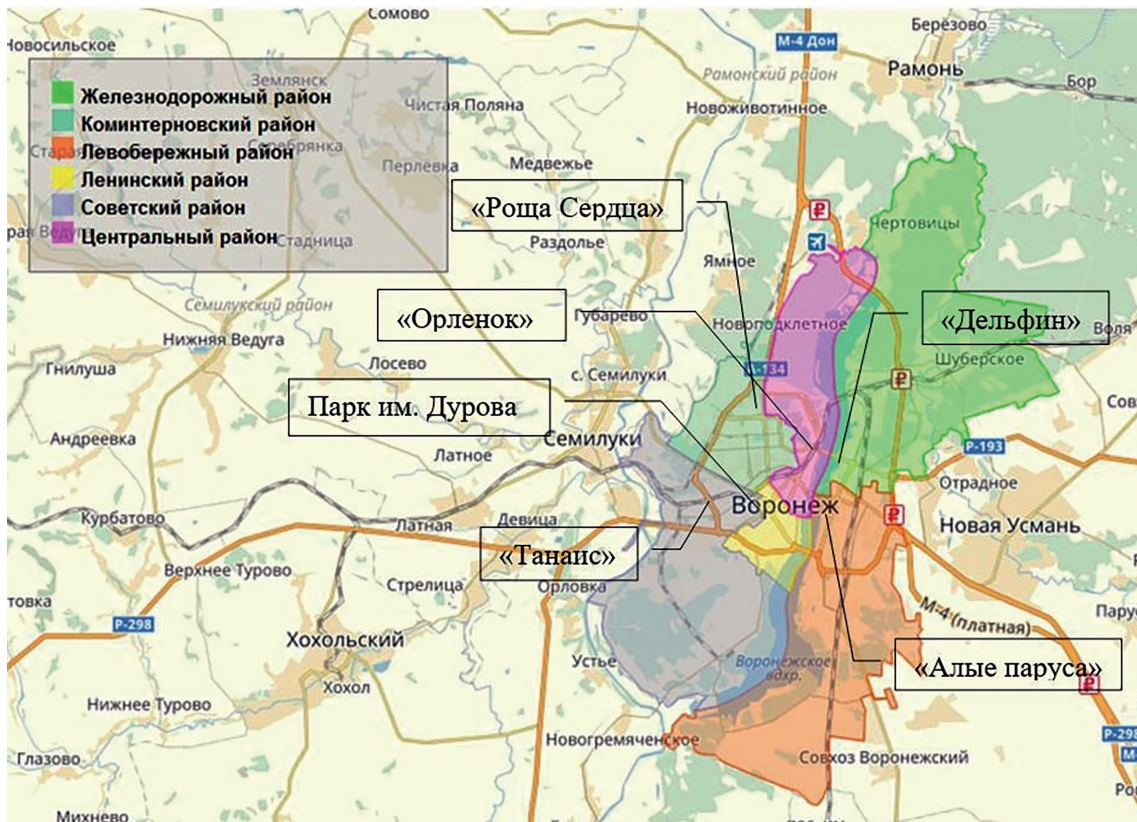


Рис. 1. Территориальное размещение анализируемых детских площадок в г. Воронеже
 Fig. 1. Territorial placement of the analyzed playgrounds in Voronezh



Рис. 2. Панорама парка «Алые паруса» г. Воронежа (<https://foto-ram.ru/фото-парка-алые-паруса-воронеж/>)
 Fig. 2. Panorama of the park «Scarlet Sails» in Voronezh (<https://foto-ram.ru/фото-парка-алые-паруса-воронеж/>)



Рис. 3. Парк «Алые паруса» г. Воронежа (<https://stroiteh-msk.ru/obzory/stroitelstvo-doma-park-alye-parusa.html>)

Fig. 3. Park «Scarlet sails» of Voronezh (<https://stroiteh-msk.ru/obzory/stroitelstvo-doma-park-alye-parusa.html>)



Рис. 4. Парк «Орленок» г. Воронежа (<https://gorcom36.ru/content/park-orlyenok-v-voronezhe-priglashaet-gostey-na-rospis-pryanikov-i-master-klass-po-fekhtovaniyu/>)

Fig. 4. Park «Orlenok» in Voronezh (<https://gorcom36.ru/content/park-orlyenok-v-voronezhe-priglashaet-gostey-na-rospis-pryanikov-i-master-klass-po-fekhtovaniyu/>)



Рис. 5. Парк «Дельфин» г. Воронежа (<https://trip-for-the-soul.ru/foto/park-delfin-voronezh.html>)
 Fig. 5. Park «Dolphin» in Voronezh (<https://trip-for-the-soul.ru/foto/park-delfin-voronezh.html>)



Рис. 6. Генеральный план парка «Дельфин» г. Воронежа. (<https://bangkokbook.ru/foto/park-delfin-voronezh-na-karte.html>)
 Fig. 6. The general plan of the park «Orlenok» in Voronezh (<https://bangkokbook.ru/foto/park-delfin-voronezh-na-karte.html>)



Рис. 7. Парк «Танаис» г. Воронежа (<https://voronezh-city.ru/communications/comments/detail/39475>)
Fig. 7. Park «Tanais» in Voronezh (<https://voronezh-city.ru/communications/comments/detail/39475>)

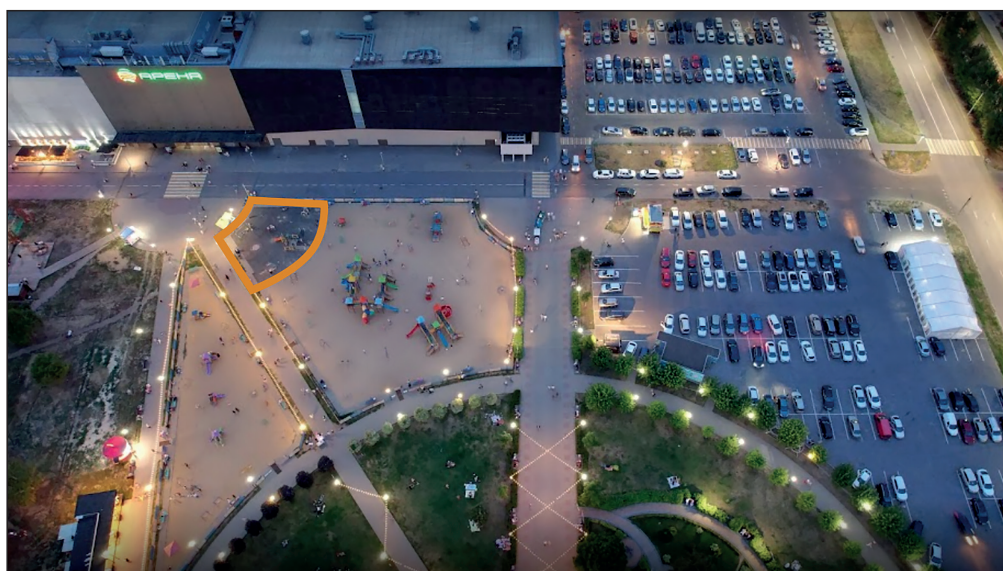


Рис. 8. Игровая и инклюзивная зоны на территории «Парка Победы»
Fig. 8. Location of the game and inclusive zones on the territory of Victory Park

В рамках исследования прежде всего проведем сравнительный анализ аналогичных объектов за рубежом и в нашей стране, который позволит сделать вывод о существенных отличиях подходов к вопросам проектирования и оснащения детских игровых зон [5, 6]. В первую очередь это касается колористических решений (рис. 10). На детских площадках в городах России используют преимущественно яркие цвета: синий, желтый и красный, вследствие чего все игровые пространства становятся похожи одно на другое и резко выделяются на окружающей их территории [7, 8].

За рубежом имеется иная практика — соблюдение гармонии колористики игровой площадки и окружающей местности.

Другая отличительная особенность российских игровых площадок — однообразие. Они оборудованы преимущественно стандартными игровыми элементами: качелями, песочницами, комплексом горок, каруселью, пружинными качалками. За рубежом площадка представляет собой цельный игровой комплекс. Так, в некоторых парках перед входом в основную игровую зону есть несколько отдельно стоящих игровых

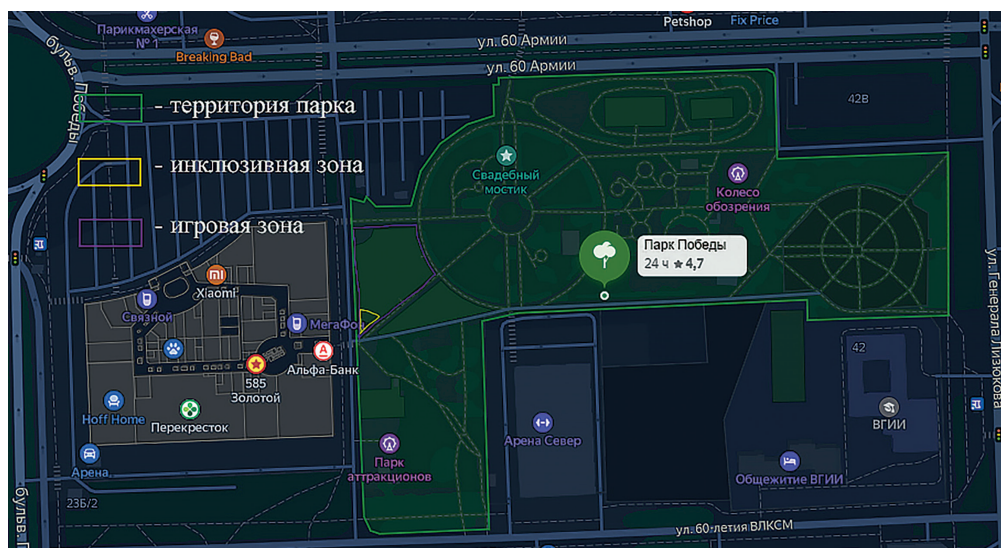


Рис. 9. Игровая и инклюзивная зоны на территории «Парка Победы»

Fig. 9. Location of the game and inclusive zones on the territory of «Victory» Park



Рис. 10. Колористика игрового пространства в «Парке Мэгги Дейли» в Чикаго (США)
(<https://mavink.com/explore/Maggie-Daley-Park-Chicago>)

Fig. 10. Coloristic solution on the example of Maggie Daley Park, Chicago
(<https://mavink.com/explore/Maggie-Daley-Park-Chicago>)

строений, например, веревочная змейка, песочница, полоса препятствий из бревен или канатов. Кроме того, игровые площадки носят обучающий характер в разных научных сферах [9]: используются механизмы для игры с песком и водой, деревья для обустройства веревочных мостов или качелей, имеются приспособления в виде возвышенностей и впадин для организации полос препятствий, даже выступы скал для лазания, несущие в себе декоративность. Самой важной особенностью служит их универсальность, так как площадкой могут пользоваться дети разных

возрастных групп [10] и разных возможностей. Зачастую, для привлечения внимания детей проектировщики и дизайнеры отказываются от привычных решений оформления, превращая игровую площадку в арт-объект со всевозможными головоломками, фонтанами, конструкциями для лазания, музыкальными инструментами и зонами для кемпинга (рис. 11).

Можно отметить и различие в отношении к безопасности детей [11]. В России детские площадки устраивают без острых углов, главным образом с элементами из пластика, в качестве



Рис. 11. Детская площадка как арт-объект (<https://ru.pinterest.com/pin/4-ways-climbing-boosts-kids-development-luckey-climbers--860117228819165961/>)

Fig. 11. Playground as an art object (<https://ru.pinterest.com/pin/4-ways-climbing-boosts-kids-development-luckey-climbers--860117228819165961/>)

Т а б л и ц а 1

Рекомендуемая толщина слоя из резиновой крошки для покрытия игровой зоны детской площадки

Recommended rubber crumb thickness to surface the play area of a playground

Толщина слоя, мм	Критическая высота падения, мм
1	2
–	До 600
20	От 700 до 1000
30	От 1100 до 1500
45	От 1500 до 1900
55	От 1900

ударопоглощающих поверхностей используют всевозможные резиновые покрытия или тонкий слой грубого песка.

На игровых площадках за рубежом как покрытие принято использовать плотный мягкий песок, древесную или резиновую стружку, опилки, а оборудование изготавливают из различных материалов, отдавая предпочтение дереву.

В результате можно сделать вывод, о том, что в России детские площадки наиболее безопасные, по сравнению с зарубежными аналогами.

Согласно действующему в России ГОСТ 34614.1–2019, каждая детская игровая площадка должна иметь ударопоглощающее покрытие для исключения случаев травматизма. Нормативный документ дает его определение, устанавливает параметры и виды, соблюдение которых обеспе-

чивает максимальную безопасность ребенка во время игры.

В соответствии с ГОСТ 34614.1–2019 детские площадки должны удовлетворять предъявляемым к ним требованиям [12]. При выборе покрытия игровой зоны на детской инклюзивной площадке рекомендуется отдать предпочтение покрытиям с амортизирующими свойствами для предотвращения травмирования детей при падении, в частности синтетическим покрытиям из резиновой крошки.

Монолитное резиновое покрытие (рис. 12), несомненно, самое эстетичное. Технология укладки позволяет использовать разные цвета, зонировать территорию, создавать рисунки. По всей площади игровой площадки бесшовная резина имеет одинаковую толщину (как правило, 10 мм), во время как в зонах падения толщина слоя должна быть еще больше [12] (табл. 1).

Из табл. 1 видно, что под сооружения высотой не более 600 мм покрытия не требуется.

Невысокое игровое оборудование — столики, балансиры, песочницы, домики, игровые пружинные качалки, игровые комплексы с невысокими горками — рассчитано, главным образом, на детей не старше 5 лет. Именно в таком случае идеально подходит яркое бесшовное покрытие толщиной 10 мм.

Если на детской площадке расположено игровое оборудование для детей старше 5 лет, при максимальной высоте падения более 1000 мм, то на ней должно быть резиновое бесшовное покрытие в обязательном порядке. Согласно правилам



Рис. 12. Бесшовное покрытие игровой площадки (<https://100architects.com/project/>)

Fig. 12. Seamless playground cover (<https://100architects.com/project/>)

безопасности, толщина резинового бесшовного покрытия в зонах возможного падения рекомендуется до 55 мм.

Для зон тихого отдыха покрытие должно быть прочным, устойчивым к атмосферным воздействиям и нагрузкам, обеспечивать отвод поверхностных, ливневых и талых вод и обладать удобством в эксплуатации [13].

Важное значение в создании гармоничных ландшафтных композиций имеют декоративные характеристики покрытий, которые выбирают исходя из назначения участка, особенностей ландшафта и архитектурной планировки территории [14]. Существующая классификация покрытий основана на характере их применения и материале. Тип покрытий должен соответствовать назначению, санитарно-гигиеническим, эстетическим и экономическим требованиям [15].

Важнейшим этапом предпроектной оценки игрового объекта для детской площадки является анализ произрастающей на нем древесной и кустарниковой растительности, газона и малых архитектурных форм [16].

Состояние деревьев визуально определяется по сумме основных биоморфологических признаков, в частности, по густоте кроны, ее облиственности или охвоенности, по соответствию размеров и цвета листьев и хвои, а также по приросту побегов, нормальному для данных видов и данного возраста деревьев, наличию или отсутствию отклонений в строении стволов, крон, ветвей и побегов, суховершинности или наличию и доле сухих ветвей в кроне, целостности и состоянию коры и луба [17].

К дополнительным признакам относят пораженность деревьев инфекционными и неинфекционными болезнями, поврежденность вредителями и другие природные и антропогенные факторы.

В городских насаждениях деревья по качественному состоянию подразделяют на три группы: 1) хорошее; 2) удовлетворительное; 3) неудовлетворительное. В соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 09.12.2020 г. № 2047 выделено пять категорий санитарного состояния (жизнеспособности) деревьев.

При оценке газона указывают его тип, местоположение на объекте, конфигурацию, размер, видовой состав травосмеси, а общее состояние [18, 19] оценивают по следующей шкале:

– *хорошее*: травянистый покров образован злаками, травостой густой, однородный, сомкнутый, без прогалин, интенсивно-зеленый, регулярно скашиваемый, без сорняков и мха, площадь проективного покрытия 90...100 %, поверхность хорошо спланирована, без заметных неровностей;

– *удовлетворительное*: травянистый покров образован злаковыми травами, нерегулярно скашиваемый, может иметь участки с редким травостоем (до 40 %) и небольшим (до 15 %) распространением нежелательной растительности, зеленый, площадь проективного покрытия не менее 75 %, поверхность газона с заметными неровностями;

– *неудовлетворительное*: травянистый покров изрежен, неоднороден, нерегулярно скашиваемый, присутствует мох и другая нежелательная

растительность, в окраске преобладают желтые оттенки, имеются массовые протоптанные участки и прогалинные, площадь проективного покрытия менее 75 %.

Оценку состояния малых архитектурных форм (МАФ) и оборудования на объекте проводят по следующей шкале:

– *хорошее состояние*: сооружения выполнены в соответствии с проектом, надежно закреплены, окрашены влагостойкими красками, возможно наличие минимальных повреждений (до 5 %), легко устранимых незначительным ремонтом;

– *удовлетворительное состояние*: имеются незначительные нарушения конструкций и частичное (не более 10 %) разрушение оборудования, не влияющие на функциональность использования; МАФ надежно закреплены, но окраска поверхности некачественная — 15 % поверхности не окрашено или окрашено небрежно, требуется текущий ремонт или замена некоторых элементов;

– *неудовлетворительное*: имеют место механические повреждения, нарушение конструкций, частичное (более 10 %) отсутствие элементов, ненадежные крепления, небрежно окрашенные или неокрашенные поверхности составляют 15 %, требуется капитальный ремонт или полная замена оборудования и МАФ [18].

Оценка состояния плоскостных сооружений состоит в выявлении повреждений бортового камня и покрытий, недостатков планировки и др.

Состояние дорожной сети и площадок оценивают по следующей шкале:

– *хорошее*: дороги хорошо спланированы, верхний слой уплотнен, отсутствуют просадки, бордюрный камень в хорошем состоянии;

– *удовлетворительное*: дорожное полотно имеет хорошую планировку, просадки и выбоины составляют до 10...15 %, на дорожках с мягким покрытием имеются отдельные экземпляры нежелательной растительности, бордюрный камень местами отсутствует;

– *неудовлетворительное*: планировка дорожного полотна нарушена, просадки и выбоины составляют более 15 %, наблюдается застой воды, дорожки с мягким покрытием заросли нежелательной растительностью [19].

Проектирование городской среды, учитывающее все требования, важные для маломобильных групп населения, предусматривает обеспечение доступности, безопасности, информативности, комфортности и основывается на градостроительном размещении. Многие способы построения пространства, формирующие доступную среду, являются необходимыми при проектировании удобных и эргономичных зон для всех людей. К ним можно отнести размерные характеристики, оптимальные зоны видимости, цветовой и шумо-

вой комфорт, тактильное разнообразие, освещенность, архитектурно-пространственную ясность окружающей искусственной среды.

Результаты и обсуждение

При создании детских площадок можно выделить основные принципы по обустройству, которые будут соответствовать требованиям детей и их родителей, а также будут актуальными на сегодняшний день. Детские игровые площадки необходимы для всестороннего развития детей, они должны создавать условия для различных видов их деятельности: игровой, творческой, художественной, учебной, познавательной и физической. Для того, чтобы соответствовать современным условиям, детские площадки должны характеризоваться экологичностью, безопасностью, доступностью, функциональностью, эргономичностью.

Важным является наличие элементов и оборудования на площадках, предназначенных для детей с разными ограниченными возможностями здоровья. Для детей, у которых больше развита верхняя часть тела, можно использовать тренажеры параворкаута, которые позволяют заниматься находясь в инвалидной коляске и качели-гнездо. Это оборудование хорошо подходит для детей с нарушениями двигательного аппарата и спастическими явлениями. Качели могут использовать и дети без каких-либо нарушений, и взрослые.

Если речь идет о детях с ментальными и сенсорными нарушениями, тогда при создании игровых элементов следует учитывать цвет и звук, которые не должны выступать как раздражители. Популярными здесь могут быть элементы, которые направлены на вестибулярную стимуляцию: спортивное оборудование, позволяющее много крутиться — различные вертушки, карусели, много развивающих стенок, модулей, которые можно крутить и переставлять их элементы. К примеру, для детей с расстройствами аутистического спектра (РАС) важно, чтобы были на площадках домики, в которых можно было бы прятаться, и не было ярких цветов [20].

По пространственному признаку детская площадка на территории «Парка Победы» принадлежит к городской среде, а по функциональному признаку — представляет собой рекреационную среду и предназначена для детей в возрасте от 3 до 7 лет.

Имеется классификация развивающих игровых площадок, которая включает в себя три основные группы [21]: 1) ассоциативные площадки; 2) геометрические; 3) комбинированные. Отличительная особенность ассоциативных детских площадок состоит в том, что игровые элементы

здесь выступают в виде образов и форм, существующих в реальном мире. Наличие различных геометрических элементов с ярко выраженной формой характерно для геометрических площадок. С их помощью можно воздействовать на эмоциональное и поведенческое состояние детей. Например, круглые формы внушают чувство безопасности и защищенности, поскольку у ребенка, вследствие отсутствия острых углов формируется образ бесконфликтной среды. Комбинированные детские игровые площадки объединяют в себе два первых типа: сочетание ассоциативных и геометрических форм открывает ребенку возможности альтернативного и нестандартного восприятия.

Определяя тематический подход исследуемых типов площадок, можно констатировать его отсутствие.

В ходе дальнейшего анализа определим виды игровой деятельности, которые можно осуществлять на указанных площадках: соревновательные, подвижные и статичные игры. Далее проанализируем поверхности и покрытия, песок. В завершение охарактеризуем игровое оборудование. По материалам — это дерево, металл и пластик, по конструкции — разборное и складное, по компоновочной структуре — образует единый комплекс, по характеру производства относится к массовому.

Таким образом, нами выявлено, что насаждения, произрастающие вокруг игровой площадки, находятся в хорошем и удовлетворительном состоянии, газон, плоскостные сооружения и МАФ по состоянию оцениваются как хорошие.

Перейдем к функциональному зонированию. На детских игровых площадках рекомендуется выделять такие функциональные зоны, как зона подвижных игр, зона спокойного времяпрепровождения, зона отдыха.

Зону подвижных игр следует размещать в более благоприятных природных условиях, в частности на участке с разнообразным рельефом, наилучшим зеленым массивом и небольшими водоемами (ручьем, речкой, прудом), при их наличии, где можно организовать игровую зону на воде. Кроме того, здесь рекомендуется установить рукоходы, лабиринты, канаты, горки, шведские стенки и другие элементы, способствующие подвижным играм детей.

Зона спокойного времяпрепровождения предусматривает тихие созерцательные игры, игры с развитием мышления или мелкой моторики. Ее следует обустроить песочницами, сенсорными панелями, домиками, оборудованием для сюжетных игр и др. Площадь такой зоны в пределах игровой площадки должна ориентировочно занимать 15 %, в зависимости от назначения и возможности этой территории.

Зону отдыха обычно размещают на удалении от основных дорожек парка, там, где минимальный уровень шума. Здесь рекомендуется устанавливать беседки, скамейки, навесы, палатки, разбивать клумбы. Площадь данной зоны должна составлять примерно 50 %.

Каждая зона на игровой площадке может отличаться по форме пространственной организации, видам оборудования, визуальным характеристикам.

Обязательным требованием при этом является наличие информационного стенда на детской игровой площадке (п. 46 ТР ЕАЭС 04/2017 «О безопасности оборудования для детских игровых площадок», п. 7.5 ГОСТ Р 52301–2013 «Оборудование и покрытия детских игровых площадок. Безопасность при эксплуатации. Общие требования»). Стенд должен содержать следующую информацию: правила пользования оборудованием и сведения о возрастных группах, где указываются ограничения по росту и весу ребенка; номера телефонов службы спасения, скорой помощи; номера телефонов организации, ответственной за эксплуатацию площадки, по которым следует обращаться в случае неисправности или поломки оборудования. На стенде также должна быть размещена информация, запрещающая ту или иную деятельность, а именно: оставлять детей до 7 лет без присмотра взрослых; находиться на территории с домашними животными; распивать спиртные напитки; мусорить; наносить повреждения и ущерб игровым элементам.

Неотъемлемой частью любой детской площадки является цвет оборудования. Правильное использование цвета может вдохновить воображение, стимулировать активную игру и задать тон для взаимодействия и социализации [22]. Цвет имеет важное значение в жизни ребенка, поскольку колористическая среда влияет на его настроение и поведение [23]. Так, некоторые цвета обладают успокаивающим действием, другие, наоборот, побуждают к деятельности.

Т а б л и ц а 2

Колористические предпочтения детей в разном возрасте

Colour preferences of children at different ages

Возраст, лет	Предпочтительный цвет	Отвергаемый цвет
4...10	Красный, пурпурный, розовый, оранжевый	Серый, черный, темно-коричневый
11...12	Зеленый, желтый, красный	Оливковый, фиолетовый
13...16	Синий, зеленый, фиолетовый	Пурпурный



Рис. 13. Пример частичного окрашивания элементов сооружений для детской площадки
Fig. 13. Example of partial structures elements coloring for a playground

Правильное сочетание цветов способствует визуальному развитию ребенка (табл. 2).

Исходя из взаимных предпочтений детей и взрослых при оформлении детских игровых площадок рекомендуются комбинированные варианты цветового дизайна.

Форма или цвет развлекательного оборудования и сооружений должны быть эстетичными. В частности, цвет влияет на комфорт, устойчивость, утомляемость и эффективность окружающей среды, поэтому к выбору цвета развлекательного оборудования следует подходить особенно тщательно.

В связи с тем что детям с различными ограничениями по здоровью требуется разный подход в выборе цвета, рекомендуется для каждой зоны использовать свой набор цветов.

Сооружения игровой зоны можно окрашивать как полностью, так и каждый элемент в отдельности, например, использовать цвета только на элементах, с которыми ребенок непосредственно взаимодействует (рис. 13), например, спуск у горок, сидения на качелях, подвижные элементы для развития мелкой моторики на сенсорных панелях или же поручни, за которые ребенок держится в целях безопасности. Для оборудования, предназначенного для активных игр, лучше использовать желтый и оранжевый цвета, для тихих игр — зеленый и синий. В зонах тихого

отдыха в качестве материала предпочтение за древесиной, хотя в целях безопасности у скамей и столов ножки должны быть выкрашены в яркий цвет, что позволит слабовидящим детям определять их местоположение и габариты, но при их использовании не возбуждать свою нервную систему яркостью оборудования.

Колористическое восприятие ребенка зависит, кроме того, от времени суток, расположения источника света, от погодных условий и времени года. Значительное влияние на восприятие цветовой среды оказывают не только применяемые комбинации цветов в оформлении оборудования или покрытий, но и окружающее их пространство, среди которого находится детская игровая площадка. Зеленые насаждения, к примеру, создают комфортную, расслабляющую обстановку, а серые здания вокруг ограничивают пространство и угнетают зрительное восприятие. В свою очередь цвет применяемых в озеленении растений сильно сказывается на общем впечатлении от игрового пространства. Например, большое количество растений с темной листвой может действовать угнетающе в вечернее время, поскольку вечером такая листва приобретает более мрачный оттенок. В связи с этим очень важно грамотно подбирать растения для создания комфортной психологической обстановки на детской игровой площадке.

С высоты собственного роста ребенка — 135 см лучше видны покрытия и игровые элементы ярких цветов, которые расположены на уровне глаз. При этом дети выше по росту меньше замечают покрытия, и угол их обзора направлен на средние и верхние части оборудования, т. е. при проектировании детских игровых площадок не используют покрытия серого и коричневого цветов, поскольку они могут воздействовать на юных посетителей детской площадки угнетающе. Рекомендуется применять такие цвета, как оранжевый, желтый, зеленый, голубой, которые, в свою очередь, будут побуждать детей к игре и создавать для них комфортную психологическую обстановку. К тому же, имеет смысл цветовые акценты размещать на разных высотах. Например, в вечернее время на общем фоне игровой площадки будут выделяться такие цвета, как желтый, салатовый, оранжевый, а синий и красный на их фоне менее заметны.

Таким образом, озеленение детских игровых площадок следует выполнять с учетом колористического восприятия детей в целях обеспечения психологически комфортной среды и создавать свободное пространство около игровых элементов. Такой подход позволит детям безопасно передвигаться в пределах игровой площадки и пребывать на уединенных участках для отдыха. Однако не рекомендуется посадка высоких деревьев по периметру, тем более по всей территории детской площадки, поскольку такие насаждения могут уменьшить инсоляцию и проветривание данного пространства.

Деревья и кустарники следует высаживать вокруг детской игровой площадки так, чтобы на одну из ее частей падала тень, а остальные большую часть дня освещались солнцем. В южных районах должно быть затенено 1/2 площади детских игровых площадок, в районах средней полосы — 1/3.

Ландшафтные группы деревьев и кустарников на территории детских игровых площадок должны служить для выделения в ее пределах самостоятельных участков для различных по своему характеру игр.

Если на территории детской игровой площадки уже находится древесная и кустарниковая растительность, необходимо включить ее в композицию зеленых насаждений.

Для новых посадок можно рекомендовать деревья, дающие легкую прозрачную тень: березу (*Betula*), рябину (*Sorbus*), ясень (*Fraxinus*), для затенения — деревья с плотной кроной: клен остролистный (*Acer platanoides*), липу (*Tilia*), тополь берлинский (*Populus berolinensis*), из кустарников — кизильник (*Cotoneaster*), сирень (*Siringa*), спирею японскую (*Spiraea japonica*) [24].

Для озеленения детских игровых площадок недопустимы посадки растений с ядовитыми ягодами и колючками. Нежелательно применение кустарников с плодами и низким расположением цветков.

Вокруг детских игровых площадок следует осуществлять посадку растений, наиболее стойких к механическим повреждениям. Во избежание повреждений растения целесообразно размещать на 25...50 см выше уровня земли. Посадки можно защитить по периметру стационарной скамьей или небольшой подпорной стенкой. Рекомендуется применять периметральное озеленение, одиночные посадки деревьев и кустарников, цветники, вертикальное и мобильное озеленение [25]. Площадки-лужайки должны быть окружены группами деревьев и кустарников, а покрытие включать в себя устойчивые к вытаптыванию виды трав [26].

Предлагаем ассортимент растений, включающий в себя лиственные и хвойные деревья и кустарники, многолетние цветочные культуры [27], а точнее и применительно для условий г. Воронежа следующие растения:

деревья: клен остролистный (*Acer platanoides*), клен остролистный 'Globosum' (*Acer platanoides*), береза повислая 'Мэджикал глоб' (*Betula pendula* 'Magicalglobe'), береза повислая 'Голденклауд' (*Betula pendula* 'Goldencloud'), рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia*), ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior*), дуб черешчатый (*Quercus robur* 'Pendula'), дуб красный (*Quercus rubra*), ива белая (*Salix alba*), вяз гладкий (*Ulmus umila*), вяз мелколистный (*Ulmus parvifolia* 'Seiju'), туя западная (*Thuja occidentalis* 'Smaragd'), туя западная (*Thuja occidentalis* 'Jantar'), туя западная 'Глобоза' (*Thuja occidentalis* 'Globose'), ель колючая (*Picea pungens* 'Blue Mountain'), ель колючая (*Picea pungens* 'Iseli Fastigiata'), ель голубая (*Picea pungens*);

кустарники: кизильник блестящий (*Cotoneaster lucidus*), сирень Мейера (*Syringa meyeri* 'Palibin'), сирень (*Syringa souvenir* 'D'alice harding', 'Zoya Kosmodem'yanskaya'), спирея японская (*Spiraea japonica* 'Little Princess', 'Candlelight', 'Little flame'), пузыреплодник калинолистный (*Physocarpus opulifolius* 'Red Baron'), пузыреплодник головчатый (*Physocarpus capitatus* 'Tildenpark'), форзиция средняя (*Forsythia intermedia* 'Lynwood', 'Boucle d'or (Courtaour)'), можжевельник казацкий (*Juniperus sabina* 'Rockery Gem'), можжевельник чешуйчатый (*Juniperus squamata* 'Blue Carpet'), можжевельник обыкновенный (*Juniperus communis* 'Green Carpet');

многолетники: хоста гибридная (*Hosta hybridum* 'Whirl wind'), очиток гибридный (*Sunsparkler* 'Cherry Tart'), очиток отогнутый (*Sedum reflexum*), флокс метельчатый (*Phlox panic-*

ulata 'Poreye'), дербенник иволистный (*Lythrum salicaria*), астильба (*Astilbe*).

Кроме того, необходимо учитывать следующие показатели: месторасположение территории; классификацию по функциональному признаку среды: жилую среду, рекреационную среду; функциональные зоны детского досуга; зонирование по возрастному признаку (присутствует, отсутствует); вид игровой деятельности; концептуально-образный и тематический подход (присутствует, отсутствует); компоновочную структуру элементов (элементы не связаны функционально-образной целостностью, элементы представляют собой единый комплекс, объединенный общей тематикой, образным подходом); элементы детских площадок (неразборные, разборные, складные, трансформируемые); виды применяемых материалов для игровых элементов; виды применяемых материалов для поверхности; озеленение (типы садово-парковых насаждений и приемы их размещения, декоративность); оценку безопасности и гигиенических условий; экологическую оценку.

Выводы

1. Многофункциональный и комплексный анализ детских игровых площадок г. Воронежа показал, что отсутствует концептуально-образный и тематический подход к их созданию. Преобладающими видами игровой деятельности являются подвижные и статичные игры.

2. Выявлено, что детские игровые площадки для детей с ограниченными возможностями здоровья должны подразделяться по возрастным категориям: до 3 лет, от 4 до 6 лет, от 7 до 12–14 лет.

3. Разработана инновационная и адаптивная цветовая гамма для детских игровых площадок для слабовидящих детей с учетом восприятия цвета, детьми с синдромом дефицита внимания и гиперактивности, аутизмом. Для сооружений активных игр рекомендуется использовать желтый, оранжевый цвет, для тихих игр желателно использовать зеленый и синий цвет.

4. Рекомендован инновационный ассортимент древесных пород, кустарников и травянистых растений для благоустройства детских игровых площадок в условиях г. Воронежа, состоящий из 12 лиственных, 6 хвойных пород деревьев, 11 лиственных и 3 хвойных видов кустарников, 13 травянистых растений.

5. Проведен анализ по устройству покрытий игровой зоны на детской инклюзивной площадке, в ходе которого следует отдать предпочтение монолитным покрытиям с ударопоглощающими свойствами, для предотвращения травмирования детей при падении. Основным видом покрытия следует считать синтетические покрытия из резиновой крошки.

6. Целесообразно на детских площадках для детей с ограниченными возможностями выделить следующие функциональные зоны: зона отдыха, зона подвижных игр, зона спокойного времяпрепровождения.

Список литературы

- [1] Барсова О.Ю. О проблеме проектирования детских игровых площадок, как части предметно-пространственной среды современного города // Молодежь и наука: шаг к успеху: Сб. науч. статей Всерос. науч. конф. перспективных разработок молодых ученых: в 3-х т. Курск: Университетская книга, 2017. С. 10–13.
- [2] Вострикова Д.А. Принципы проектирования детских игровых площадок // Инновации. Наука. Образование, 2020. № 23. С. 432–437.
- [3] Боговая И.О., Фурсова Л.М. Ландшафтное искусство. М.: Агропромиздат, 1988. 223 с.
- [4] Биоразнообразие города Воронежа / под ред. О.П. Негрובה. Воронеж: Изд-во Воронежского государственного университета, 2004. 98 с.
- [5] Куно Н. Сочетание цветов на практике. Минск: Попурри, 2020. 304 с.
- [6] Васильева О.И., Бочкова И.Ю. Цвет как средство выразительности в архитектурно-ландшафтной композиции // Сб. докл. III Междунар. науч.-практ. конф. Устойчивое развитие территорий, Москва, МИСИ–МГСУ, 2021 г., 26–27 мая. М.: Изд-во МИСИ–МГСУ, 2021. С. 34–38.
- [7] Омеляненко Е.В. Цветоведение и колористика. М.: Планета Музыки; Лань, 2014. 104 с.
- [8] Халлер К. Маленькая книга цвета / пер. с англ. Ю. Гольдберг. М.: КоЛибри, 2019. 272 с.
- [9] Карташова Н.П., Хазова Е.П. Благоустройство и озеленение территорий общеобразовательных детских учреждений на примере Воронежской области // Лесотехнический журнал, 2016. Т. 6. № 1 (21). С. 85–92.
- [10] Горохов В.А. Городское зеленое строительство. М.: Стройиздат, 1991. 416 с.
- [11] Стармер А. Умные решения для организации жизненного пространства. М.: КоЛибри, 2021. 272 с.
- [12] ГОСТ 34614.1–2019 Оборудование и покрытия детских игровых площадок. Безопасность конструкции и методы испытаний. Общие требования. Введ. 2020-08-01. М.: Издательство стандартов, 2020. 92 с.
- [13] Тетиор А.Н. Экология городской среды. М.: Академия, 2013. 352 с.
- [14] Фирсова Н.В., Кругляк В.В. Закономерности размещения городов в системе лесных комплексов Центрально-Черноземного региона // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология, 2011. № 2. С. 26–32.
- [15] Инструкция по проведению инвентаризации и паспортизации городских озелененных территорий. М.: Прима-М, 2002. 23 с.
- [16] Кругляк В.В., Карташова Н.П. Урбоэкология и мониторинг среды. В 2 ч. Ч. 1. Воронеж: Изд-во ВГЛТА, 2004. 71 с.
- [17] Фирсова Н.В. Эколого-градостроительный анализ состояния зеленых насаждений Воронежа // Проблемы озеленения крупных городов, 2005. Вып. 11. С. 69–71.
- [18] Теодоронский В.С., Жеребцова Г.П. Озеленение населенных мест. Градостроительные основы. М.: Академия, 2010. 256 с.
- [19] Фатиев М.М. Строительство городских объектов озеленения. М.: Форум, 2012. 204 с.
- [20] Ибрагимов И.А., Козюк Н.Б. Архитектурное проектирование детской игровой площадки для увлекательных игр. Екатеринбург: Изд-во Уральского федерального университета, 2019. 95 с.

- [21] ГОСТ 28329–89. Озеленение городов. Термины и определения. М.: Издательство стандартов, 1990. 13 с.
- [22] Финли В. Цвет. Захватывающее путешествие по оттенкам палитры. М.: Бомбора, 2022. 416 с.
- [23] Алексахин Н.Н., Васильева О.И. Основы цветоведения в ландшафтном проектировании. М.: МГУЛ, 2010. 76 с.
- [24] ГОСТ 25769–83. Саженьцы деревьев хвойных пород для озеленения городов. Технические условия от 23 июня 2009 г. М.: Росстандарт, 2009. 10 с.
- [25] Кругляк В.В., Гурьева Е.И. Древоводство. Воронеж: Изд-во ВГЛТА, 2011. 144 с.
- [26] Shen Q., Liu Y. Exploring Association between Morphology of Tree Planting and User Activities in Urban Public Space; An opportunity of Urban Public Space Revitalisation // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2018, v. 128, p. 012054. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/128/1/012054>
- [27] Теодоронский В.С., Авсиевич Н.А., Фролова В.А., Якубов Х.Г. О качественном и количественном аспектах оценки состояния растений в городских зеленых насаждениях // Экология большого города. Проблемы содержания зеленых насаждений в условиях Москвы. Вып. 4. М.: Прима-Пресс-М, 2000. С. 29–37.

Сведения об авторах

Кругляк Владимир Викторович [✉] — д-р с.-х. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», kruglyak_vl@mail.ru

Карташова Нелли Павловна — канд. с.-х. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Kartashova_73@mail.ru

Поступила в редакцию 25.05.2023.

Одобрено после рецензирования 06.07.2023.

Принята к публикации 23.08.2023.

SPECIAL FEATURES OF PLAYGROUNDS FOR DISABLED CHILDREN

V.V. Kruglyak¹ [✉], N.P. Kartashova²

¹Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, 1, Michurinast., 394087, Voronezh, Russia

²Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva st., 39408, Voronezh, Russia

kruglyak_vl@mail.ru

The article deals with the issue of forming an accessible environment for children with disabilities. The modern design trend experience to create the same conditions for the disabled and healthy children are analyzed. The aspects of designing an accessible environment for children with disabilities, as well as the conditions determining and justifying the use of special equipment, were studied. The classification of conditions for the relevant design of special equipment to eliminate architectural barriers has been formed. The application principles of playgrounds universal design from the standpoint of spatial, poly sensory and semantic accessibility are proposed.

Keywords: children's playground, children with disabilities, greening and landscaping

Suggested citation: Kruglyak V.V., Kartashova N.P. *Osobennosti formirovaniya detskikh ploshchadok dlya detey s ogranichennymi vozmozhnostyami* [Special features of playgrounds for disabled children]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 6, pp. 40–55. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-40-55

References

- [1] Barsova O.Yu. *O probleme proektirovaniya detskikh igrovykh ploshchadok, kak chasti predmetno-prostranstvennoy sredy sovremennogo goroda* [On the problem of designing children's playgrounds as part of the subject-spatial environment of a modern city]. *Molodezh' i nauka: shag k uspekhu: sb. nauch. statey Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii perspektivnykh razrabotok molodykh uchenykh: v 3-kh tomakh* [Youth and science: a step towards success: coll. scientific articles of the All-Russian scientific conference of promising developments of young scientists: in 3 volumes]. Kursk: Universitetskaya kniga, 2017, pp. 10–13.
- [2] Vostrikova D.A. *Printsipy proektirovaniya detskikh igrovykh ploshchadok* [Principles of designing children's playgrounds]. *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie* [Innovations. The science. Education], 2020, no. 23, pp. 432–437.
- [3] Bogovaya I.O., Fursova L.M. *Landshaftnoe iskusstvo* [Landscape Design]. Moscow: Agropromizdat, 1988, 223 p.
- [4] *Bioraznoobrazie goroda Voronezha* [Biodiversity of the city of Voronezh]. Ed. O.P. Negrobov. Voronezh: Voronezh State University, 2004, 98 p.
- [5] Kuno N. *Sochetanie tsvetov na praktike* [Combination of colors in practice]. Minsk: Potpourri, 2020, 304 p.
- [6] Vasil'eva O.I., Bochkova I.Yu. *Tsvet kak sredstvo vyrazitel'nosti v arkhitekturno-landshaftnoy kompozitsii* [Color as a means of expression in architectural and landscape composition]. *Sb. dokl. III Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Ustoychivoe razvitiye territoriy* [Sat. report III Intern. scientific-practical. conf. Sustainable development of territories]. Moscow: MISI–MGSU, 2021, pp. 34–38.
- [7] Omel'yanenko E.V. *Tsvetovedenie i koloristika* [Color science and coloristics]. Moscow: Planet of Music; Lan', 2014, 104 p.
- [8] Haller K. *Malen'kaya kniga tsveta* [The Little book of color]. Moscow: Kolibri, 2019, 272 p.

- [9] Kartashova N.P., Khazova E.P. *Blagoustroystvo i ozelenenie territoriy obshcheobrazovatel'nykh detskikh uchrezhdeniy na primere Voronezhskoy oblasti* [Landscaping and landscaping of the territories of educational children's institutions on the example of the Voronezh region]. *Lesotekhnicheskiy zhurnal* [Forestry technical journal], 2016, v. 6, no. 1 (21), pp. 85–92.
- [10] Gorokhov V.A. *Gorodskoe zelenoe stroitel'stvo* [Urban green building]. Moscow: Stroyizdat, 1991, 416 p.
- [11] Starmer A. *Umnyye resheniya dlya organizatsii zhiznennogo prostranstva* [Smart solutions for the organization of living space]. Moscow: KoLibri, 2021, 272 p.
- [12] GOST 34614.1–2019 *Equipment and coverings of children's playgrounds. Design safety and test methods. General requirements - Introduction*. 2020-08-01. Moscow: Publishing House of Standards, 2020, 92 p.
- [13] Tetior A.N. *Ekologiya gorodskoy sredy* [Ecology of the urban environment]. Moscow: Publishing Center «Academy», 2013, 352 p.
- [14] Firsova N.V., Kruglyak V.V. *Zakonomernosti razmeshcheniya gorodov v sisteme lesnykh kompleksov Tsentral'no-Chernozemnoy regiona* [Patterns of location of cities in the system of forest complexes of the Central Black Earth region]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya* [Bulletin of the Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology], 2011, no. 2, pp. 26–32.
- [15] *Instruktsiya po provedeniyu inventarizatsii i pasportizatsii gorodskikh ozelenennykh territoriy* [Instructions for inventory and certification of urban green areas]. Moscow: Prima-M, 2002, 23 p.
- [16] Kruglyak V.V., Kartashova N.P. *Urboekologiya i monitoring sredy* [Urban ecology and environmental monitoring]. P. 1. Voronezh: VGLTA, 2004, 71 p.
- [17] Firsova N.V. *Ekologo-gradostroitel'ny yanaliz sostoyaniya zelenykh nasazhdeniy Voronezha* [Environmental and urban planning analysis of the state of green plantations Voronezh]. *Problemy ozeleneniya krupnykh gorodov* [Problems landscaping large cities]. Moscow: Prima-M, 2005, v. 11, pp. 69–71.
- [18] Teodoronskiy V.S., Zherebtsova G.P. *Ozelenenie naseledennykh mest. Gradostroitel'nye osnovy* [Greening populated areas. Town building foundations]. Moscow: Academy, 2010, 256 p.
- [19] Fatiev M.M. *Stroitel'stvo gorodskikh ob'ektov ozeleneniya* [Construction of urban landscaping facilities]. Moscow: Forum, 2012, 204 p.
- [20] Ibragimov I.A., Kozyuk N.B. *Arkhitekturnoe proektirovanie detskoj igrovoy ploshchadki dlya uvlekatel'nykh igr* [Architectural design of a children's playground for exciting games]. Yekaterinburg: Ural Federal University Press, 2019, 95 p.
- [21] GOST 28329–89 *Ozelenenie gorodov. Terminy i opredeleniya* [Greening of cities. Terms and Definitions]. Moscow: Ed. Standards, 1990, 13 p.
- [22] Finley V. *Tsvet. Zakhvatyuyushchee puteshestvie po ottenkam palitry* [Color: A Natural History of the Palette]. Moscow: Bombora, 2021, 416 p.
- [23] Aleksakhin N.N., Vasil'eva O.I. *Osnovy tsvetovedeniya v landshaftnom proektirovanii* [Fundamentals of color science in landscape design]. Moscow: MSFU, 2010, 76 p.
- [24] GOST 25769–83 *Sazhentsy derev'ev khvoynnykh porod dlya ozeleneniya gorodov* [Saplings of coniferous trees for landscaping cities]. Specifications of June 23, 2009. Moscow: Rosstandart, 2009, 10 p.
- [25] Kruglyak V.V., Gur'eva E.I. *Drevovodstvo* [Tree breeding]. Voronezh: VGLTA, 2011, 144 p.
- [26] Shen Q., Liu Y. Exploring Association between Morphology of Tree Planting and User Activities in Urban Public Space; An opportunity of Urban Public Space Revitalisation // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2018, v. 128, p. 012054. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/128/1/012054>
- [27] Teodoronskiy V.S., Avsievich N.A., Frolova V.A., Yakubov Kh.G. *O kachestvennom i kolichestvennom aspektakh otsenki sostoyaniya rasteniy v gorodskikh zelenykh nasazhdeniyakh* [About the qualitative and quantitative aspects of assessing the state of plants in urban green areas]. *Ekologiya bol'shogo goroda. Problemy soderzhaniya zelenykh nasazhdeniy v usloviyakh Moskvy* [Ecology of a big city. Problems of maintenance of green spaces in Moscow]. Moscow: Prima-Press-M, 2000, iss. 4, pp. 29–37.

Authors' information

Kruglyak Vladimir Viktorovich [✉] — Dr. Sci. (Agriculture), Professor of the Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, kruglyak_vl@mail.ru

Kartashova Nelly Pavlovna — Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor of the Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Kartashova_73@mail.ru

Received 25.05.2023.

Approved after review 06.07.2023.

Accepted for publication 23.08.2023.

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

ТЕНДЕНЦИИ И ФАКТОРЫ ИЗМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВНЕШНЕЭКОНОМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ ЛЕСНОГО КОМПЛЕКСА РФ В 2022 Г.

Н.Б. Пинягина, Е.Б. Назаренко, Н.С. Горшенина✉

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

gorshenina2303@icloud.com

Проанализировано состояние и определены тенденции изменения экспортного потенциала предприятий лесного комплекса РФ. Указаны факторы, влияющие на динамику объемов производства и реализации лесобумажной продукции в условиях санкционной политики. Обоснована необходимость поиска новых подходов формирования структуры международных лесных рынков. Рекомендованы основные направления повышения эффективности внешнеэкономической деятельности лесопромышленных предприятий в современных условиях.

Ключевые слова: экспорт, импорт, цены, рынки, лесной комплекс, внешнеэкономическая деятельность, лесобумажная продукция, индексы, санкции, спрос

Ссылка для цитирования: Пинягина Н.Б., Назаренко Е.Б., Горшенина Н.С. Тенденции и факторы изменения показателей внешнеэкономической деятельности предприятий лесного комплекса РФ в 2022 г. // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 6. С. 56–65. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-56-65

Оценка влияния новых экономических условий второй половины 2022 г., на показатели внешнеэкономической деятельности предприятий лесного комплекса РФ составляет важное направление укрепления позиций российских экспортеров лесопродукции на мировом рынке.

Анализ изменений объемов экспорта и импорта лесобумажной продукции, индекса цен ее производителей, построение тенденций изменения показателей внешнеэкономической деятельности лесопромышленных предприятий за 2021 и 2022 гг. позволил определить причины и первоочередные проблемы, препятствующие увеличению экспортно-импортных операций в лесном комплексе РФ и предложить пути их преодоления в ближайшей перспективе [1–4].

Цель работы

Цель работы — формирование основных направлений развития внешнеэкономической деятельности лесного комплекса РФ на основе повышения конкурентоспособности лесопродукции и поиска новых рынков целевых потребителей.

Рассматриваемая тема относится к актуальным направлениям исследований в связи с санкционной политикой западных стран в отношении экономики России, требующей новых неординарных решений, поиска иных товарных рынков,

преодоления логистических трудностей, а также принятия мер поддержки российских экспортеров со стороны государства [5–20].

Экономические условия работы лесопромышленных предприятий, сложившиеся во второй половине 2022 г. и связанные, прежде всего, с поставкой лесобумажной продукции в европейские страны, крайне негативно отразились на эффективности их внешнеэкономической деятельности. Это продиктовало необходимость разработки пути выхода из кризисной ситуации.

С апреля 2022 г. началось резкое снижение как внутренних, так и экспортных цен на лесобумажную продукцию, произошла дестабилизация ее экспортных и импортных поставок на международные лесные рынки. По информации Министерства экономического развития Российской Федерации объем экспорта товаров из России по итогам 11 мес. 2022 г. в стоимостном выражении составил \$538 млрд, что оказалось на 23,4 % больше, чем за аналогичный период предыдущего года. При этом на дружественные страны пришлось \$350 млрд. Доля недружественных стран в сумме российских зарубежных поставок снизилась с 58 до 35 %, а доля нейтральных и дружественных экономик возросла с 42 до 65 % [24–26].

Анализ изменения индексов цен на продукцию предприятий лесопромышленного комплекса (ЛПК) за 2022 г. по сравнению с 2021 г. показал, что практически во всех отраслях они заметно снизились (табл. 1) [1].

Наибольшее снижение индекса цен за рассматриваемый период наблюдалось на предприятиях по обработке древесины — на 20,5 %. В меньшей степени индексы снизились на продукцию мебельных предприятий — на 4,3 % и целлюлозно-бумажных предприятий — на 3,2 %. Это свидетельствует о том, что деревообрабатывающие предприятия в наибольшей степени пострадали от введения санкций и потери традиционных рынков, что негативно повлияло на стоимость их продукции.

Индексы цен в различных отраслях ЛПК за 2021 и 2022 гг. в определенные периоды времени имели разнонаправленные тенденции. Так, в целлюлозно-бумажной отрасли цены на продукцию отличались большой нестабильностью, в период с января по апрель 2022 г. их индекс поднялся на 2,4 %, однако затем к августу последовало его резкое падение (–8,6 %), затем к октябрю он вновь начал расти — на 9,3 %, а к декабрю упал на 6,9 % (рис. 1) [1].

В деревообрабатывающей промышленности индекс цен с января по февраль незначительно снизился, однако к апрелю последовал его заметный рост (7,4 %). Вместе с тем в период с апреля по июль цены на продукцию деревообработки начали резко снижаться, их индекс упал на 11,5 %, а к декабрю 2022 г. он вновь вырос на 5,3 %.

Помесячные тенденции индекса цен в 2022 г. были ломаными, нестабильными вследствие сложной ситуации в экономике страны, снижения покупательной способности потребителей и закрытия некоторых рынков по причине введения западными странами санкций.

Динамика экспорта круглого необработанного леса из России по сравнению с его производством за период с 2010 по 2022 гг. свидетельствует о том, что ошутимое падение индекса цен в 2022 г. оказалось результатом запрета поставок древесины хвойных и ценных лиственных пород (дуба, бука, ясеня) за рубеж и введения недружественными странами эмбарго на поставку лесопроductии. Начиная с 2022 г. из России разрешено экспортировать исключительно неценные лиственные породы (березу, осину), а число пунктов пропуска для зарубежных поставок сократилось до двух. Железнодорожные тарифы перевозки лесных грузов с 1 января 2022 г. увеличились более чем в 70 раз, что привело к резкому падению их экспортного потока на зарубежные рынки (рис. 2) [21–23].

В первом полугодии 2022 г. предприятия и организации ЛПК сократили поставки необработанной древесины за рубеж на 50 %, а по итогам года — уже до 7 млн м³, т. е. на 70 %. В результате доля экспорта круглого леса в объеме производства за 12 лет снизилась с 15,4 до 3,5 %, что,

Т а б л и ц а 1

Сравнительные индексы цен на продукцию предприятий лесопромышленного комплекса, %

Comparative price indices for the products of timber industry enterprises, %

Предприятия лесопромышленного комплекса	2022 г. к 2021 г.	Декабрь 2022 г. к декабрю 2021 г.
Деревообрабатывающие	109,0	79,5
По производству мебели	105,8	95,7
По целлюлозно-бумажному производству	111,0	96,8

по мнению руководителей Российского государства и участников лесных отношений, должно способствовать развитию глубокой переработки древесины в стране, выпуску продукции с более высокой добавленной стоимостью.

По данным Федеральной таможенной службы (ФТС) России самые большие поставки лесопроductии направляются в Китайскую народную республику. Так, в 2022 г. в Китай было поставлено 44 % всей необработанной древесины, предназначенной к поставкам за рубеж — около 1,5 млн м³. Однако если сравнивать с 2021 г., экспорт «кругляка» в Китай уменьшился в 2 раза. Второй по объему импорта необработанной древесины из России оказалась Финляндия. Она, несмотря на введенные санкции, увеличила поставки этой продукции до 1,3 млн м³, или более чем на 30 %. Третье место по импорту круглого леса из России заняла Белоруссия (4 % российского лесного экспорта), где рост экспортных поставок этой продукции составил 131,9 тыс. м³, т. е. увеличился в 3 раза (рис. 3).

К тому же существенно, на 53,3 %, возросли поставки круглого леса в Иран, Южную Корею, соответственно, увеличились в 3 раза, в Таджикистан — в 2 раза, в Объединенные Арабские Эмираты — в 4 раза [1].

На ситуацию с изменением структуры международных лесных рынков и объема экспорта лесобумажной продукции за рубеж в значительной степени повлияло и то, что 8 апреля 2022 г. Евросоюз включил в пятый пакет санкций против нашей страны эмбарго на импорт основных категорий лесных товаров: древесины и изделий из нее, древесной массы, крафт-бумаги и крафт-картона, а также мебели и ее частей (табл. 2) [1].

Таким образом, анализ изменения структуры экспортных рынков при поставках необработанной древесины из России свидетельствует о том, что, с одной стороны, на это повлиял запрет Правительства Российской Федерации на поставки круглого леса за рубеж, с другой стороны —

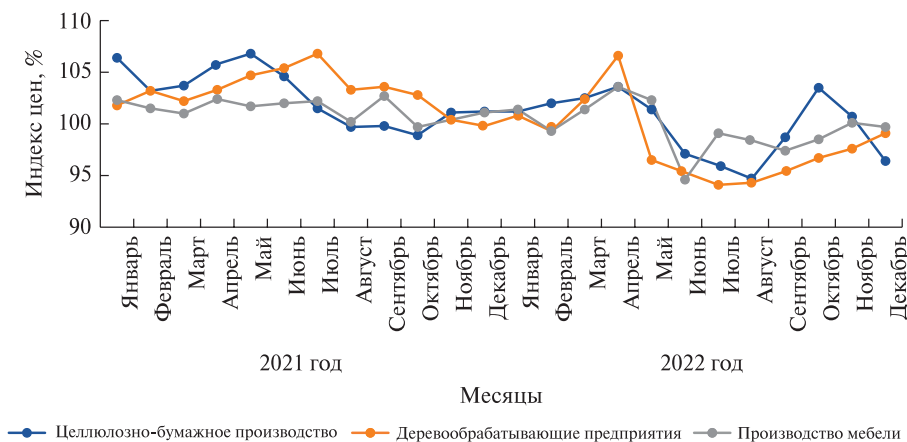


Рис. 1. Динамика изменения индекса цен на продукцию предприятий лесопромышленного комплекса в 2021 и 2022 гг.
Fig. 1. Dynamics of change in the price index for the products of the timber industry enterprises in 2021 and 2022

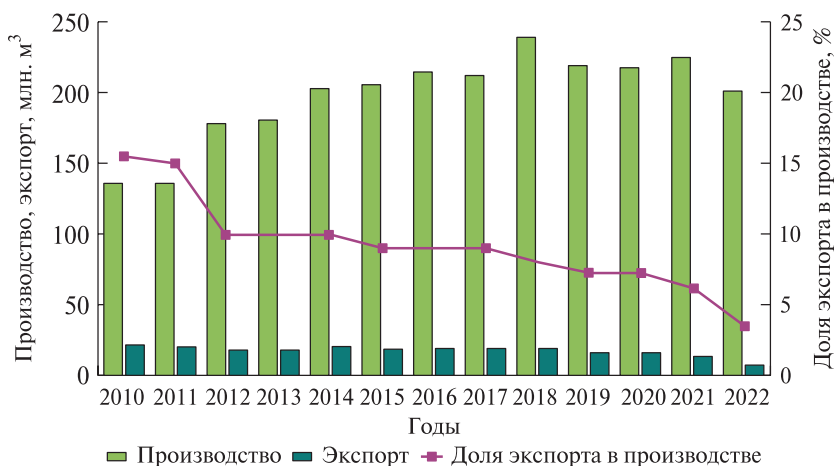


Рис. 2. Сравнительная динамика производства и экспорта необработанной древесины за период с 2010 по 2022 гг.
Fig. 2. Comparative dynamics of raw wood production and export for the period from 2010 to 2022

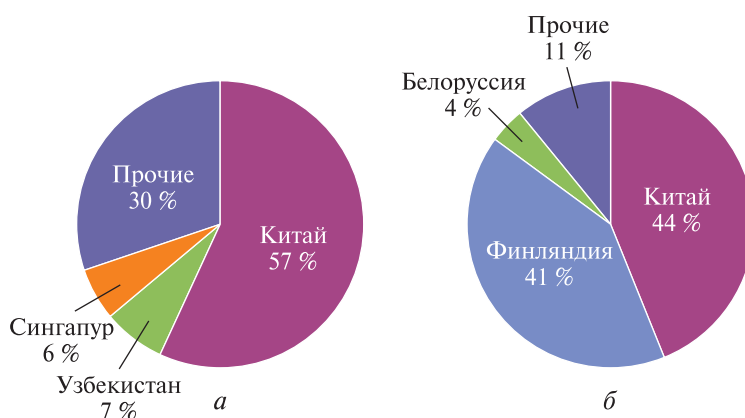


Рис. 3. Структура экспортных поставок круглого леса и пиломатериалов в разрезе стран-потребителей в 2022 г.: а — круглый лес; б — пиломатериалы
Fig. 3. Structure of export supplies of roundwood and sawn timber by consumer countries in 2022: а — roundwood; б — sawn wood

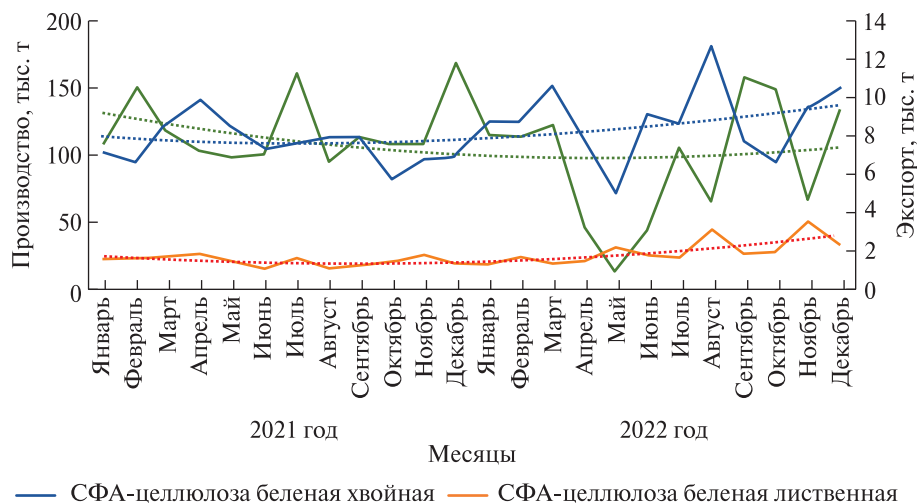


Рис. 4. Динамика объемов экспорта целлюлозы и древесной массы за 2021 и 2022 гг.
Fig. 4. Dynamics of pulp and groundwood pulp fiber volumes for 2021 and 2022

введение санкций со стороны стран Евросоюза, после чего традиционные западные рынки оказались недоступными для российских лесных экспортеров.

С 10 июля 2022 г. со стороны Евросоюза начал действовать запрет на поставки в Россию некоторых видов пиломатериалов, древесных плит, фанеры, бумаги и картона, смол для производства мебели, продукции машино- и станкостроения для лесоперерабатывающей промышленности.

Многие экспортно-ориентированные лесопромышленные компании резко снизили загрузку мощностей, например, в октябре 2022 г. их загрузка составляла не более 30...40 %. А часть компаний российского ЛПК, ориентированных на экспорт, остановила производственный процесс. По расчетам специалистов, Россия вследствие санкций потеряла потенциальный доход от поставок лесобумажной продукции на европейские рынки в размере \$4...6 млрд в год.

Помесячные изменения объемов экспорта лесобумажной продукции за период с января 2021 г. по декабрь 2022 г. характеризуются нестабильностью тенденций, особенно в 2022 г., по причине возникших проблем в экономике и внешнеэкономической деятельности страны [23, 26].

Наиболее ярким примером нестабильности является динамика экспорта целлюлозы и древесной массы за 2021 и 2022 гг. Основной экспортный товар в целлюлозно-бумажной продукции (ЦБП) — белая хвойная сульфатная целлюлоза после существенного падения объемов экспорта с марта по май 2022 г. (–53 %) к августу показала существенный рост (в 2,5 раза) (рис. 4).

Изменения экспорта тарных видов картона за 2021 и 2022 гг. также свидетельствуют о резком колебании тенденций в 2022 г. Так, зарубежные поставки крафтлайнера, тестлайнера и флютинга

Т а б л и ц а 2

Объемы экспорта и импорта основных видов продукции целлюлозно-бумажной промышленности за 2021 и 2022 гг., тыс. т
Export and import volumes of the main types of pulp and paper industry products for 2021 and 2022, thousand tonnes

Наименование продукции	2021 г.	2022 г.	Изменение, %
Экспорт продукции целлюлозно-бумажного производства			
Древесная масса	139,5	84,5	60,6
Целлюлоза	2139,8	2380,8	111,3
Тарные виды картона целлюлозного	1063,8	893,4	83,4
Тарные виды картона из макулатуры	889,9	817,1	91,8
Импорт продукции целлюлозно-бумажного производства			
Древесная масса	0,67	0,11	16,4
Целлюлоза	210,4	96,4	45,8
Тарные виды картона целлюлозного	2,2	0,4	18,2
Тарные виды картона из макулатуры	74,0	32,3	43,6

макулатурного заметно возрастали с января по май–июнь (крафтлайнер — на 51,4 %, тестлайнер — более чем в 3 раза), однако затем рост сменился падением вплоть до ноября 2022 г. (крафтлайнер — на 59,1 %, тестлайнер — на 67,3 %), и только к концу декабря 2022 г. падение экспорта тарных видов картона прекратилось и даже наметился его рост (рис. 5) [23, 25, 26].

Среди позиций лесобумажной продукции, поставляемой в Россию по импорту, основными являются хвойная белая сульфатная целлюлоза распушенная, лиственная белая сульфатная целлюлоза эвкалиптовая, а также флютинг

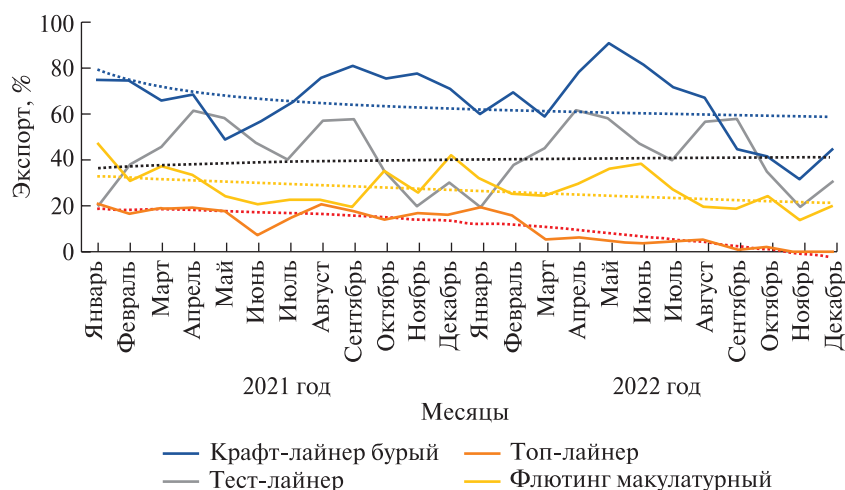


Рис. 5. Динамика объемов экспорта основных видов продукции предприятий целлюлозно-бумажной промышленности за 2021 и 2022 гг.

Fig. 5. Dynamics of export volumes of the main products of the pulp and paper industry in 2021 and 2022

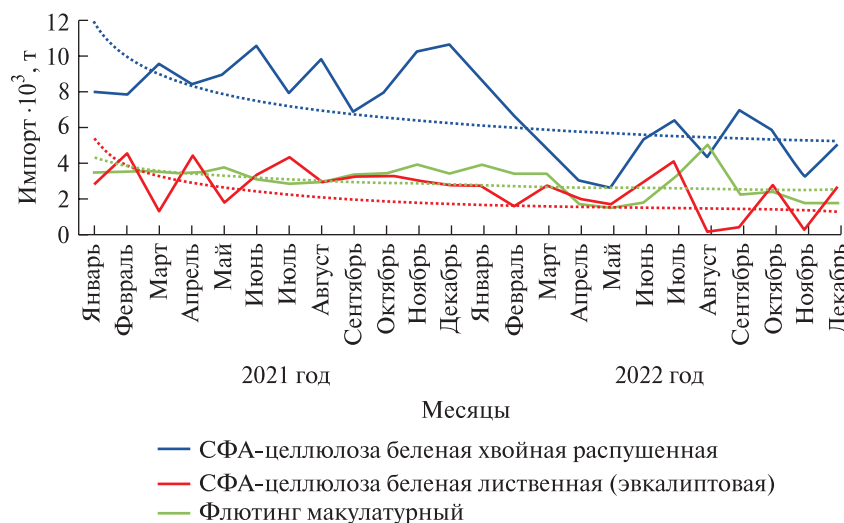


Рис. 6. Динамика объемов импорта основных видов продукции предприятий целлюлозно-бумажной промышленности за 2021 и 2022 гг.

Fig. 6. Dynamics of import volumes of the pulp and paper industry main products in 2021 and 2022

(бумага для гофрирования) макулатурный. Анализ динамики импорта этой продукции в страну за последние два года при общих тенденциях снижения показал их нестабильность и резкие изменения именно в 2022 г. (рис. 6).

Наиболее существенное снижение объемов импорта всех видов лесобумажной продукции наблюдалось в период с декабря 2021 г. по май 2022 г. (по целлюлозе распушенной — 70,4 %), затем к июлю–августу последовало увеличение объемов импорта (на 67 %), однако к ноябрю импортные поставки этой продукции начали снова снижаться (на 53,7 %), однако к концу декабря они вновь перешли в рост.

В течение первых месяцев 2023 г. рынок Китайской народной республики традиционно

остался основным рынком сбыта для российских лесопромышленных предприятий. Его доля за первые два месяца составила 63,0 % объема зарубежных поставок пиломатериалов хвойных и лиственных пород. Далее следует Узбекистан, его доля составляет 10,1 % (260 тыс. м³). Объем экспорта в южном направлении остался на уровне 2022 г. Однако объемы экспорта пиломатериалов в Таджикистан и Гонконг увеличились в 1,4 и 1,8 раза соответственно (рис. 7).

При существенном росте производства и экспорта основных видов лесобумажной продукции в 2021 г., к концу 2022 г. было отмечено их резкое снижение вследствие санкционного давления на экономику России со стороны недружественных стран (рис. 8).

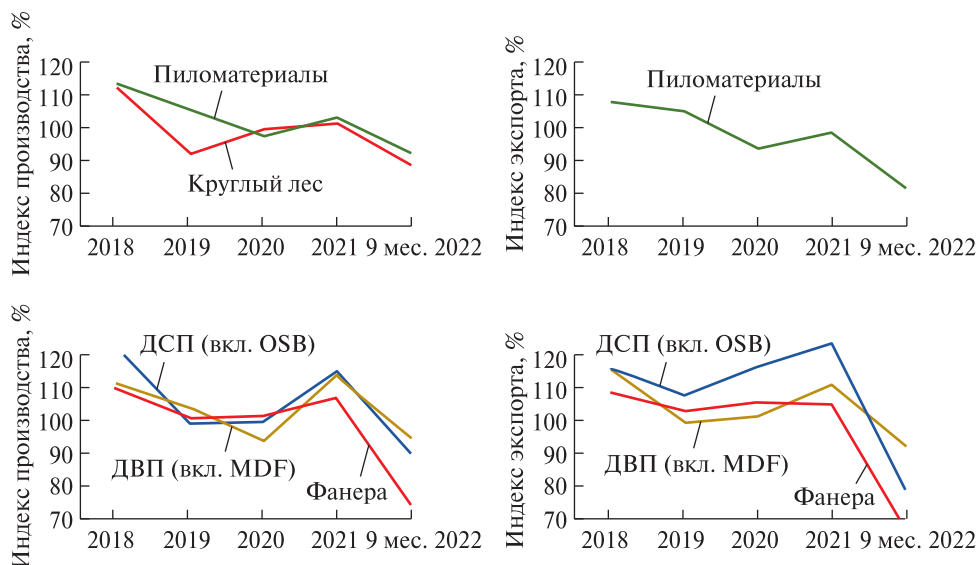


Рис. 7. Динамика индексов производства и экспорта основных видов деревообрабатывающей промышленности за период с 2018 по 2022 гг. (относительно предыдущего периода)

Fig. 7. Dynamics of production and export indices of the main types of woodworking industry for the period from 2018 to 2022 (relative to the previous period)

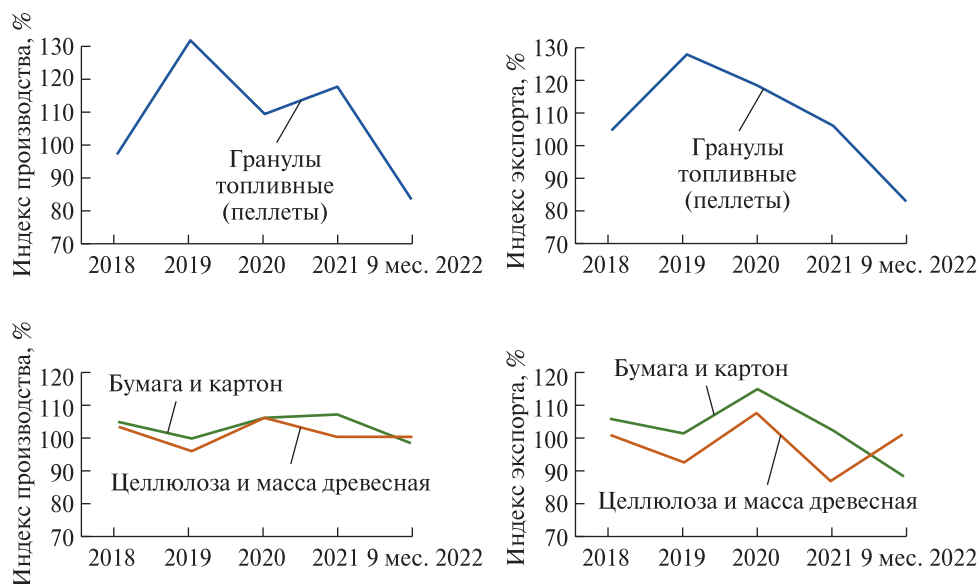


Рис. 8. Динамика индексов производства и экспорта топливных гранул и основных видов целлюлозно-бумажной промышленности за период с 2018 по 2022 гг. (относительно предыдущего периода)

Fig. 8. Dynamics of production and export indices of fuel pellets and main types of pulp and paper industry for the period from 2018 to 2022 (relative to the previous period)

В январе–феврале 2023 г. необработанная древесина экспортировалась лишь в семь стран. При этом 87,4 % всего объема зарубежных поставок осуществлялось в Китайскую народную республику. Всего из нашей страны было поставлено на внешние рынки 354,8 тыс. м³ кругляка, что более чем в 3 раза меньше по сравнению с аналогичным периодом 2022 г. Такое резкое снижение экспорта древесины свидетельствует об эффективности

введенного с 1 января 2022 года ограничения зарубежных поставок круглого леса хвойных и ценных лиственных пород для стимуляции развития глубокой переработки древесины внутри страны [22, 24].

Объем экспорта круглого леса в Китай уменьшился в первом полугодии 2023 г. на четверть по сравнению с тем же периодом 2022 г., объем зарубежных поставок необработанного кругляка

в Белоруссию, Иран и Узбекистан сократился примерно втрое, в то время как в Казахстан, Кыргызстан и Азербайджан он заметно вырос.

В 2022 г. объем экспорта пиломатериалов из России на зарубежные рынки в натуральном выражении снизился на 22 % — до 23,4 млн м³. Заметно сократили импортные поставки из России такие ключевые страны-партнеры, как Казахстан (на 19,5 %), Сингапур (на 35,3 %), Япония (на 44,5 %), Азербайджан (на 53,9 %) и т. д. Вместе с тем Россия на 7,2 % увеличила поставки пилопродукции в Китай, на который приходится 63 % всего экспорта пиломатериалов на внешние рынки. Кроме того, существенно возросли зарубежные поставки в Иран и ОАЭ — в 1,5 раза по каждому направлению, а также в Турцию — в 3,5 раза [25, 26].

Наиболее стабильными рынками пиломатериалов в 2023 г., как и прежде, останутся рынки стран Юго-Восточной Азии. Учитывая ускоренное развитие торговых отношений с Индией, экспорт пилопродукции на огромный индийский рынок, вероятно, увеличится. Многие отечественные лесопромышленные компании смогли перестроиться на работу со странами Азиатско-Тихоокеанского региона, такими, как Китай, Южная Корея, Япония, Таиланд и т. д. Российский лесной бизнес вполне может конкурировать в этих странах с европейскими лесными компаниями, причем цены на пиломатериалы там стабильные [22, 24].

Наиболее значительное падение объемов выпуска и экспорта произошло в отношении топливных гранул (многие производства были остановлены по причине отсутствия рынков), а также фанеры, пиломатериалов и древесно-стружечных плит. Вместе с тем, благополучными в новых экономических условиях показали себя производство и в особенности экспорт целлюлозы и древесной массы, которые к концу 2022 г. продемонстрировали рост [1].

Выводы

В первом полугодии 2023 г. объем экспорта лесобумажной продукции из России в стоимостном выражении уменьшился по сравнению с рекордными значениями 2022 г. При этом его переориентация с западных экспортных поставок на рынки Юго-Восточной Азии, Турции, страны Африки и Латинской Америки продолжится.

Ожидаемое в 2023 году снижение объемов экспорта лесобумажной продукции из России объясняется прогнозами по замедлению роста мировой экономики вследствие дальнейшего ужесточения денежно-кредитной политики в развитых странах, что во многом может быть компенсировано возобновившемся ростом экономики Китая [1, 22, 24].

Однако во втором полугодии 2023 г. возможны и более позитивные сценарии, по мере восстановления экономики Китая после снятия ограничений, связанных с распространением эпидемии ковида-19. Интенсивный рост поставок лесоматериалов в Китай в 2023 г. может затормозить высокая загруженность железнодорожных магистралей в связи с резким увеличением объемов перевозок грузов железнодорожным и автомобильным транспортом в южном и восточном направлениях [22, 24].

Преодолеть кризисные явления во внешнеэкономической деятельности предприятий ЛПК помогли главным образом экстренные меры господдержки:

- отмена пошлин на оборудование, комплектующие, расходные материалы и запасные части из стран Азиатско-Тихоокеанского региона, не имеющие аналогов в РФ, а также дополнительных ограничений на импорт меламина, поставки изоцианатов и бумаги-основы для плитной отрасли из Китая;

- компенсация затрат на экспортные перевозки лесобумажной продукции, повышение предельного субсидирования ее транспортировки с 11 до 25 % стоимости грузов;

- решение вопроса с нехваткой подвижного состава на сети ОАО «РЖД» для перевозки продукции из древесины с высокой добавленной стоимостью;

- предоставление приоритетного доступа к железнодорожной инфраструктуре восточного направления для продукции из древесины с высокой добавленной стоимостью;

- увеличение количества пограничных пунктов пропуска для вывоза пиломатериалов до 1 января 2024 г. с 69 до 105 пунктов, разрешение поставок пеллет и щепы через все пропускные и морские пункты на Дальнем Востоке;

- проработка посольствами и торговыми представительствами РФ в странах, не относящихся к недружественным, вопроса снижения порога входа на эти рынки, а также поиска контрагентов;

- поддержка создания инжиниринговых центров на базе ведущих вузов, а также в виде инвестиционных проектов и частно-государственного партнерства для стимулирования развития лесного машино- и станкостроения.

В целом рост объемов экспорта лесобумажной продукции по отдельным направлениям свидетельствует о том, что за год санкционных ограничений российским предприятиям ЛПК удалось найти новых контрагентов и оперативно перенастроить логистические и торговые пути.

Список литературы

- [1] Российский статистический ежегодник 2022 г. URL: <http://www.rosstat.gov.ru> (дата обращения 10.04.2023).

- [2] Шкваря Л.В. *Мировая экономика*. М.: Юнити-Дана, 2017. 303 с.
- [3] Агибалов А.В., Бичева Е.Е., Алещенко О.М. *Международные финансы*. Воронеж: Изд-во ВГАУ, 2015. 241 с.
- [4] Щегорцов В.А., Таран В.А. *Мировая финансовая система. Международный финансовый контроль* / под ред. В.А. Щегорцова. М.: Юнити-Дана, 2017. 529 с.
- [5] Berglof E., Foray D., Landesmann M., Lin J. Y., Campos M. N., Sanfey P., Radosevic S., Volchkova N. Transition economics meets new structural economics // *J. of Economic Policy Reform*, 2015, v. 18, no. 3, pp. 191–220.
- [6] Cimoli M., Porcile G. Technology, structural change and BOP-constrained growth: A structuralist toolbox // *Cambridge J. of Economics*, 2014, v. 38, no. 1, pp. 215–237.
- [7] De Vries G., Timmer M., de Vries K. Structural transformation in Africa: Static gains, dynamic losses // *The J. of Development Studies*, 2015, v. 51, no. 6, pp. 674–688.
- [8] Di Meglio G., Gallego J., Maroto A., Savona M. Services in developing economies: A new chance for catching-up? // *SPRU Working Paper Series*, 2015, no. 2015–32, pp. 1–33.
- [9] Felipe J., Mehta A. Deindustrialization? A global perspective // *Economics Letters*, 2016, v. 149, pp. 148–151.
- [10] Gouvea R., Lima G. Balance of payments constrained growth in a multisectoral framework: A panel data investigation // *J. of Economic Studies*, 2013, v. 40, no. 2, pp. 240–254.
- [11] Haraguchi N., Cheng C.F.C., Smeets E. The importance of manufacturing in economic development: Has this changed? // *World Development*, 2017, v. 93, pp. 293–315.
- [12] Herrendorf B., Rogerson R., Valentinyi A. Growth and structural transformation. *Handbook of economic growth*, vol. 2 / Eds. P. Aghion, S. Durlauf. Amsterdam and New York: North Holland, 2014, pp. 855–941.
- [13] Marconi N., de Borja Reis C.F., de Araújo E.C. Manufacturing and economic development: The actuality of Kaldor's first and second laws // *Structural Change and Economic Dynamics*, 2016, v. 37, pp. 75–89.
- [14] McMillan M., Rodrik D., Sepulveda C. Structural change, fundamentals and growth: A framework and case studies. NBER Working Paper, 2017, no. 23378. URL: <http://www.nber.org/papers/w23378> (accessed 15.03.2022).
- [15] Oreiro J. Inconsistency and over determination in balance of payments constrained growth models: A note // *Review of Keynesian Economics*, 2016, v. 4, no. 2, pp. 193–200.
- [16] Romano L., Trau F. The nature of industrial development and the speed of structural change // *Structural Change and Economic Dynamics*, 2017, v. 42, pp. 26–37.
- [17] Romero J., McCombie J. The multi-sectoral Thirlwall's law: Evidence from 14 developed European countries using product level data // *International Review of Applied Economics*, 2016, v. 30, no. 3, pp. 301–332.
- [18] Timmer M.P., de Vries G.J., de Vries K. Patterns of structural change in developing countries. *Routledge handbook of industry and development* / Eds. J. Weiss, M. Tribe. UK and New York: Routledge, 2015, pp. 65–83.
- [19] Vorona A.A., Panishko E.P., Osipova A.I. Trends and prospects of forestry and timber export in the Russian Federation: regional aspect. *The Eurasian Scientific Journal*, 2021, no. 2(13). URL: <https://esj.today/PDF/45ECVN221.pdf> (accessed 15.03.2022).
- [20] UNECE/FAO «Annual Forest Product Market Review 2015–2020», *Timber Bulletin*, 2022. URL: <https://unece.org/info/publications/pub/348599> (accessed 15.03.2022).
- [21] Пинягина Н.Б., Горшенина Н.С. Обзор реализации стратегических задач развития лесного комплекса России // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2019. Т. 23. № 6. С. 105–116.
- [22] Пинягина Н.Б., Горшенина Н.С. Назаренко Е.Б. Исследование влияния новых экономических условий на социально-экономические результаты деятельности предприятий лесного комплекса за 2022 год и пути преодоления кризиса // *Экономика и предпринимательство*, 2023. № 1. С. 660–666.
- [23] Пинягина Н.Б., Горшенина Н.С. Исследование тенденций изменения показателей целлюлозно-бумажной промышленности по основным видам продукции в 2021 г. // *Экономика и предпринимательство*, 2022. № 1. С. 435–448.
- [24] Пинягина Н.Б., Горшенина Н.С. Назаренко Е.Б. Влияние новой экономической реальности 2022 года на производственные показатели предприятий и организаций лесного комплекса // *Экономика и предпринимательство*, 2023. № 2 (152). С. 162–168.
- [25] Пинягина Н.Б. Обзор и анализ статистической информации о деятельности целлюлозной промышленности за три квартала 2021 г. // *Научно-публицистический журнал для профессионалов и лидеров упаковочной отрасли «Packaging R&D»*, 2022. № 1(45). С. 6–46.
- [26] Пинягина Н.Б., Горшенина Н.С. Современное состояние, тенденции и перспективы развития целлюлозно-бумажной промышленности Российской Федерации // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2022. Т. 26. № 6. С. 148–160.

Сведения об авторах

Пинягина Наталья Борисовна — д-р экон. наук, профессор кафедры «Экономика и управление», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), nbp50@yandex.ru

Назаренко Елена Борисовна — канд. экон. наук, доцент, зав. кафедрой «Экономика и управление», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), lana1409@yandex.ru

Горшенина Наталья Станиславовна — канд. экон. наук, доцент кафедры «Экономика и управление», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), gorshenina2303@icloud.com

Поступила в редакцию 01.06.2023.

Одобрено после рецензирования 03.07.2023.

Принята к публикации 23.08.2023.

TRENDS AND FACTORS OF CHANGES IN FOREIGN ECONOMIC ACTIVITIES OF TIMBER INDUSTRY COMPANIES IN RUSSIAN FEDERATION 2022

N.B. Pinyagina, E.B. Nazarenko, N.S. Gorshenina✉

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

gorshenina2303@icloud.com

Based on a study of indicators of foreign economic activity and manufacturers' prices for timber and paper products for 2021 and 2022, the impact of the sanctions policy of unfriendly countries on the changes in prices was assessed. Analysis of trends in exports and imports of the main types of products by timber industry companies over the past two years made it possible to identify the periods and reasons for their decline. The article presents the results of the work of the export-oriented timber industry companies in adapting to the new economic conditions, searching for the new foreign partners and promptly reconfiguring logistics and trade routes in the southeast direction.

Keywords: export, import, prices, markets, timber industry, foreign economic activity, timber and paper products, indices, sanctions, demand

Suggested citation: Pinyagina N.B., Nazarenko E.B., Gorshenina N.S. *Tendentsii i faktory izmeneniya pokazateley vneshneekonomicheskoy deyatel'nosti predpriyatiy lesnogo kompleksa RF v 2022 g.* [Trends and factors of changes in foreign economic activities of timber industry companies in Russian Federation 2022]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 6, pp. 56–65. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-56-65

References

- [1] *Rossiyskiy statisticheskiy ezhegodnik 2022 g.* URL: <http://www.rosstat.gov.ru> (accessed 10.04.2023).
- [2] Shkvarya L.V. *Mirovaya ekonomika* [World economy]. Moscow: Yuniti-Dana, 2017, 303 p.
- [3] Agibalov A.V., Bicheva E.E., Aleshchenko O.M. *Mezhdunarodnye finansy* [International finance]. Voronezh: VGPU, 2015, 241 p.
- [4] Shchegortsov V.A., Taran V.A. *Mirovaya finansovaya sistema. Mezhdunarodnyy finansovyy kontrol'* [The global financial system. International financial control]. Ed. V.A. Shchegortsova. Moscow: Yuniti-Dana, 2017, 529 p.
- [5] Berglof E., Foray D., Landesmann M., Lin J.Y., Campos M.N., Sanfey P., Radosevic S., Volchkova N. Transition economics meets new structural economics. *J. of Economic Policy Reform*, 2015, v. 18, no. 3, pp. 191–220.
- [6] Cimoli M., Porcile G. Technology, structural change and BOP-constrained growth: A structuralist toolbox. *Cambridge J. of Economics*, 2014, v. 38, no. 1, pp. 215–237.
- [7] De Vries G., Timmer M., de Vries K. Structural transformation in Africa: Static gains, dynamic losses. *The J. of Development Studies*, 2015, v. 51, no. 6, pp. 674–688.
- [8] Di Meglio G., Gallego J., Maroto A., Savona M. Services in developing economies: A new chance for catching-up?. *SPRU Working Paper Series*, 2015, no. 2015–32, pp. 1–33.
- [9] Felipe J., Mehta A. Deindustrialization? A global perspective. *Economics Letters*, 2016, v. 149, pp. 148–151.
- [10] Gouvea R., Lima G. Balance of payments constrained growth in a multisectoral framework: A panel data investigation. *J. of Economic Studies*, 2013, v. 40, no. 2, pp. 240–254.
- [11] Haraguchi N., Cheng C.F.C., Smeets E. The importance of manufacturing in economic development: Has this changed? *World Development*, 2017, v. 93, pp. 293–315.
- [12] Herrendorf B., Rogerson R., Valentinyi A. Growth and structural transformation. *Handbook of economic growth*, v. 2 / Eds. P. Aghion, S. Durlauf. Amsterdam and New York: North Holland, 2014, pp. 855–941.
- [13] Marconi N., de Borja Reis C.F., de Araújo E.C. Manufacturing and economic development: The actuality of Kaldor's first and second laws. *Structural Change and Economic Dynamics*, 2016, v. 37, pp. 75–89.
- [14] McMillan M., Rodrik D., Sepulveda C. Structural change, fundamentals and growth: A framework and case studies. *NBER Working Paper*, 2017, no. 23378. Available at: <http://www.nber.org/papers/w23378> (accessed 15.03.2022).
- [15] Oreiro J. Inconsistency and over determination in balance of payments constrained growth models: A note. *Review of Keynesian Economics*, 2016, v. 4, no. 2, pp. 193–200.
- [16] Romano L., Trau F. The nature of industrial development and the speed of structural change. *Structural Change and Economic Dynamics*, 2017, v. 42, pp. 26–37.
- [17] Romero J., McCombie J. The multi-sectoral Thirlwall's law: Evidence from 14 developed European countries using product level data. *International Review of Applied Economics*, 2016, v. 30, no. 3, pp. 301–332.
- [18] Timmer M.P., de Vries G.J., de Vries K. Patterns of structural change in developing countries. *Routledge handbook of industry and development* / Eds. J. Weiss, M. Tribe. UK and New York: Routledge, 2015, pp. 65–83.
- [19] Vorona A.A., Panishko E.P., Osipova A.I. Trends and prospects of forestry and timber export in the Russian Federation: regional aspect. *The Eurasian Scientific Journal*, 2021, no. 2(13). Available at: <https://esj.today/PDF/45ECVN221.pdf> (accessed 15.03.2022).
- [20] UNECE/FAO «Annual Forest Product Market Review 2015–2020», *Timber Bulletin*, 2022. Available at: <https://unece.org/info/publications/pub/348599> (accessed 15.03.2022).
- [21] Pinyagina N.B., Gorshenina N.S. *Obzor realizatsii strategicheskikh zadach razvitiya lesnogo kompleksa Rossii* [Review of implementation of the strategic objectives on Russian forest complex development]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 6, pp. 105–116.

- [22] Pinyagina N.B., Gorshenina N.S. Nazarenko E.B. *Issledovanie vliyaniya novykh ekonomicheskikh usloviy na sotsial'no-ekonomicheskie rezul'taty deyatel'nosti predpriyatiy lesnogo kompleksa za 2022 god i puti preodoleniya krizisa* [Studying the impact of the new economic environment on the socio-economic results of the forest complex enterprises activities in 2022 and ways to overcome the crisis]. *Ekonomika i predprinimatel'stvo* [Economics and Entrepreneurship], 2023, no. 1, pp. 660–666.
- [23] Pinyagina N.B., Gorshenina N.S. *Issledovanie tendentsiy izmeneniya pokazateley tsellyulozno-bumazhnoy promyshlennosti po osnovnym vidam produktsii v 2021 godu* [A study of trends in the performance of the pulp and paper industry by main types of products in 2021]. *Ekonomika i predprinimatel'stvo* [Economics and Entrepreneurship], 2022, no. 1, pp. 435–448.
- [24] Pinyagina N.B., Gorshenina N.S. Nazarenko E.B. *Vliyanie novoy ekonomicheskoy real'nosti 2022 goda na proizvodstvennye pokazateli predpriyatiy i organizatsiy lesnogo kompleksa* [The influence of the new economic reality of 2022 on the performance of enterprises and organizations of the timber complex]. *Ekonomika i predprinimatel'stvo* [Economics and Entrepreneurship], 2023, no. 2, pp. 162–168.
- [25] Pinyagina N.B. *Obzor i analiz statisticheskoy informatsii o deyatel'nosti tsellyuloznoy promyshlennosti za tri kvartala 2021 g.* [Review and analysis of statistical information on the activities of the pulp industry for the three quarters of 2021] *Nauchno-publitsisticheskiy zhurnal dlya professionalov i liderov upakovochnoy otrasli «Packaging R&D»* [Scientific journalistic journal for professionals and leaders of the packaging industry «Packaging R&D»], 2022, no. 1, pp. 6–46.
- [26] Pinyagina N.B., Gorshenina N.S. *Sovremennoe sostoyanie, tendentsii i perspektivy razvitiya tsellyulozno-bumazhnoy promyshlennosti Rossiyskoy Federatsii* [Current state, trends and prospects of development of the pulp and paper industry of the Russian Federation]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 6, pp. 148–160.

Authors' information

Pinyagina Natal'ya Borisovna — Dr. Sci. (Economy), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), nbp50@yandex.ru

Nazarenko Elena Borisovna — Cand. Sci. (Economy), Associate Professor, Head of the Department «Economics and Management», BMSTU (Mytishchi branch), lana1409@yandex.ru

Gorshenina Natal'ya Stanislavovna [✉] — Cand. Sci. (Economy), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), gorshenina2303@icloud.com

Received 01.06.2023.

Approved after review 03.07.2023.

Accepted for publication 23.08.2023.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

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

The authors declare that there is no conflict of interest

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ФОРМИРОВАНИЯ ИННОВАЦИОННОГО ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННОГО КЛАСТЕРА В СВЕРДЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Г.П. Бутко¹✉, М.А.Меньшикова², А.В. Мехренцев³,
Е.А. Тихомиров⁴, Л.А. Раменская¹, П.А. Поротников⁵

¹ФГБОУ ВО «Уральский государственный экономический университет», Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта / Народной Воли, д. 62/45

²ФГБОУ ВО «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза летчика-космонавта А.А. Леонова», Россия, 141070, Московская обл., г. Королев, ул. Гагарина, д. 42

³ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», 620100, Россия, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, д. 37

⁴ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

⁵ФГКОУ ВО «Уральский юридический институт Министерства внутренних дел Российской Федерации», Россия, 620057, Екатеринбург, ул. Корепина, д. 66

gpbuto@mail.ru

Рассмотрены обеспечение экономического роста и диверсификация экономики в результате повышения конкурентоспособности предприятий-поставщиков оборудования и предприятий, предоставляющих специализированные услуги проведения научно-исследовательской деятельности в лесных производственных кластерах, а также конкретные вопросы становления инновационного кластера. Приведен аналитический метод получения информации о естественно-исторических и экономических условиях Свердловской области. Охарактеризованы проблемы состояния экологии и восстановления лесопользования. Выделены такие экономические параметры, как область опережающей эффективности и область отстающей эффективности. Впервые представлены две составляющие, необходимые для создания кластера: экономическая и организационная, а также в дополнение к ним сырьевая и кадровая составляющие и научно-технический потенциал. Показаны эффективность промышленного лесного кластера и целесообразность его рассмотрения с позиции обеспеченности ресурсами и степени локализации в экономическом пространстве региона, что в отличие от существующих подходов позволяет более четко сформулировать приоритеты применения методов идентификации и оценки эффективности развития экономических кластеров. Дана оценка возможности притока инвестиций и в целом инновационных возможностей структурных подотраслей лесного сектора экономики.

Ключевые слова: инновационный кластер, лесной сектор экономики, устойчивое развитие региона, модернизация региональной экономики, конкурентоспособность, конкурентные преимущества, древесные ресурсы

Ссылка для цитирования: Бутко Г.П., Меньшикова М.А., Мехренцев А.В., Тихомиров Е.А., Раменская Л.А., Поротников П.А. Экономическая оценка формирования инновационного лесохозяйственного кластера в Свердловской области // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 6. С. 66–74.
DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-66-74

Современное состояние и динамика мирового рынка лесосырьевых ресурсов свидетельствует о том, что Россия остается крупнейшей лесной державой, несмотря на нынешнее шоковое состояние мировой экономики. Практика подтверждает, что финансово-экономический кризис придал дополнительный положительный импульс для появления новых эволюционных перспектив. При этом объема современных исследований, учитывающих особенности России недостаточно, что обуславливает необходимость выявления новых факторов, влияющих на эффективность формирования инновационного лесного кластера, способов и приоритетов рационального использования ресурсов в лесном секторе экономики.

Важное значение приобретают устойчивое развитие лесного сектора экономики и обеспечение его устойчивых конкурентных позиций на основе формирования кластеров инновационного типа. Систему кластеров экономисты рассматривают главным образом как способ активизации малого и среднего бизнеса, как метод консолидации сильных сторон крупных, средних и малых предприятий, а также научных организаций для получения конкурентных преимуществ и как метод развития и укрепления партнерства и стратегических союзов. В результате аутсорсинга осуществляются углубление специализации малых и средних предприятий и их развитие на основе инновационной ориентации, достижения ими качественно нового уровня технологии, организации и управления производством, повышается эффективность деятельности всех

участников кластера, в том числе организаций инфраструктуры (транспортной, информационной, образовательной и т. д.). Кластеры формируют условия для инновационного развития экономики в результате объединения ресурсов высокотехнологичных производств и потенциала научно-исследовательского сектора, а также создания необходимых организационных предпосылок, обеспечиваемых органами государственного управления. Инновации становятся фактором высокой конкурентоспособности предприятий и их товаров благодаря участию в кластерах научно-исследовательских организаций, высших учебных заведений.

Характер и тенденции развития региональной экономики следует рассматривать по следующим крупным периодам:

- индустриальное производство с опорой на машиностроительный сектор;
- постиндустриальное производство с опорой на нематериальное производство (науку, образование, сферу услуг).

Цель работы

Цель работы — содействие экономическому росту лесных производственных кластеров и диверсификации экономики в результате повышения конкурентоспособности предприятий-поставщиков оборудования и предприятий, предоставляющих специализированные услуги проведения научно-исследовательской деятельности.

Современное состояние экономики России отличается динамизмом развития лесопромышленных кластеров, приоритетным на данном этапе. Данная перспектива отличается особыми достижениями и значимостью и зачастую выступает как составляющая государственной программы «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности», а также национальных проектов «Экология», «Туризм». Формирование таких инициатив является стержнем для перспективных направлений развития лесного сектора экономики, в том числе сельских территорий и туризма.

Динамика воспроизводства материального благосостояния в создавшейся ситуации и в сложившихся экономических отношениях будет определяться непосредственно масштабами использования интеллектуального потенциала, технологий, методов управления, и особенно реформированием многоуровневой системы образования и исследований в высшей школе в деле подготовки специалистов-профессионалов.

Значимость профессиональных знаний для экономического развития региона для достижения оптимальной эффективности кластера, безусловно, занимает первые позиции, опережая средства производства и природные ресурсы [1–7].

Теоретический обзор. Перспективы и особенности формирования лесопромышленного кластера Уральского Федерального округа, в частности Свердловской области, базируются на следующих позициях [8]:

- формирование ядра перерабатывающих предприятий, ориентированных преимущественно на переработку лиственной древесины (фанерных комбинатов, комбинатов по производству древесных плит ДСП, OSB, MDF);
- совершенствование лесоэнергетических направлений (производство тепловой энергии и нормированного древесного топлива) и лесохимического (древесный уголь) производства с учетом высокой доли низкосортной лиственной древесины;
- развитие деревообработки на основе роста объемов индустриального деревянного домостроения;
- рост числа малых подрядных лесозаготовительных производств, ориентированных на сырьевое обеспечение местных лесопереработчиков;
- производство целлюлозно-бумажной продукции на площадке малообъемных производств изделий с высокой добавленной стоимостью (тарной продукции, писчей бумаги, бумаги санитарно-гигиенического назначения);
- наличие собственной научно-производственной, исследовательской и инжиниринговой базы кластера Уральского лесного технопарка;
- эффективное многоуровневое кадровое обеспечение кластера за счет университетского научно-образовательного лесотехнического комплекса.

В условиях неустойчивости экономики рассматривается формирование на территории Свердловской области лесостроительного, лесоэнергетического, мебельного кластеров и, в качестве альтернативы, формирование единого лесопромышленного кластера Свердловской области. Участие муниципальных лесных территорий в процессе кластеризации региона существенно повышает результативность работы предприятий малого предпринимательства.

В нынешних границах кластера сосредоточены средние и достаточно крупные лесные площади, в пределах которых формируется территориальная компонента общей заинтересованности в деятельности непосредственных участников.

Лесные территории и угодья выступают основой и базисом производственно-хозяйственной деятельности населения и обеспечения его занятости.

В соответствии с экономическим развитием инновационный лесохозяйственный кластер предусматривает рациональное размещение

производительных сил в условиях дефицита лесосырьевых ресурсов.

Обоснование локальных «точек роста» территориального лесопромышленного кластера должно происходить при наличии якорного предприятия на базе выделения земельных участков и инвестиционных площадок для новых производств в целях привлечения инвесторов за пределами территории.

Одним из объектов исследования выступает Тавдинский городской округ, который отличается исторической значимостью и располагает большим потенциалом развития и роста промышленности как за счет увеличения загрузки существующих производственных мощностей, совершенствования их технической базы и повышения конкурентоспособности выпускаемой продукции, так и в результате развития новых производств по освоению лесных ресурсов на основе инновационных и наукоемких технологий.

Промышленный и экономический потенциал Тавдинского городского округа (ТГО) следует рассматривать совместно с Туринским городским округом, имеющим долгосрочные перспективы повышения конкурентоспособности. Усиление экономических позиций лесопромышленного комплекса является стратегическим направлением развития территории, а промышленная политика — важнейшим инструментом его пространственного развития.

Производственный лесопромышленный кластер инновационного типа должен обеспечить максимальную устойчивость экономики и обусловить проявление ее наиболее сильных конкурентных позиций на рынке. Кластерный подход к перспективному промышленному развитию территории вытекает из особенностей развития и размещения производительных сил и природно-производственных условий. Интерес в этом смысле представляет лесопромышленный комплекс, ориентированный на переработку древесного сырья лиственных пород с центральным хозяйствующим субъектом, в частности ООО «Тавдинский фанерно-плитный комбинат». В состав лесопромышленного инновационного кластера должен входить комплекс предприятий малого бизнеса лесозаготовительной, мебельной, транспортной, биоэнергетической, лесохимической, пищевой и туристической направленности, ориентированный на освоение ресурсов на арендованных лесных землях, а также на освоение бывших промышленных площадок гидролизного и лесопильного комбинатов. Кадровым обеспечением кластера занимается образовательный комплекс, созданный на основе ГБОУ СПО «Тавдинский техникум механической обработки древесины» и ФГБОУ ВО «Уральский

государственный лесотехнический университет». Специализированной организацией формирующегося инновационного лесопромышленного кластера должна стать областная некоммерческая организация работодателей «Уральский Союз лесопромышленников». В целях реализации общей стратегической идеи и намеченных стратегических направлений развития в рамках названных комплексов поставлены задачи выбора предприятиями соответствующих точек роста, а также интеграции местной экономики в ключевые областные кластеры и координации реализуемых проектов, что в дискуссионном порядке обсуждалось специалистами [1–32].

Перспективы развития территории Тавдинского и Туринского городских округов переходят от промышленно-сырьевых к промышленно-инновационным, транспортным, биоэнергетическим, туристско-рекреационным, пищевым отраслям. На перспективу намечена реализация следующих направлений кластерной политики [8]:

- устойчивое лесопользование на основе ведения интенсивного лесного хозяйства в пределах территорий соседних районов в Свердловской, Пермской, Тюменской областях и Ханты-Мансийского автономного округа — Югры;
- комплексное освоение недревесных ресурсов леса;
- производство нормированных видов биотоплива с использованием древесных отходов якорного предприятия;
- лесохимическая переработка бересты и древесной зелени на высокотехнологичные виды продукции;
- транспортное освоение территории на основе водных и автомобильных путей;
- производство минеральной воды и пищевых биодобавок на основе лесных ягод и дикоросов;
- туристическое освоение территорий.

В рамках муниципалитета при такой перспективе анализу подлежит эффективность комплексного решения вопроса потенциальной и реальной отдачи по следующим авторским критериям и показателям [5]:

- показателю прироста ценности по прибыльности;
- показателю обеспечения новых рабочих мест;
- критерию сотрудничества предприятия с ресурсной базой;
- критерию соответствия предприятия структуре местной экономики.

Особое значение имеют критерии для обоснования инвестиционных проектов и их инновационной составляющей. В результате объединения двух округов появляется возможность более широкого внедрения инноваций и получения высо-

кой технологичной продукции за счет минимизации энергозатрат в результате восстановления Туринского целлюлозно-бумажного завода. Не менее важной является инновационная продукция на основе лигноцеллюлозы, необходимая для металлургической промышленности.

Авторы [5, 8] рассматривают вопросы реализации политики импортозамещения в промышленном секторе экономики России с позиции кластерного подхода, акцентируя внимание на инновационном обеспечении данной проблемы.

Результаты и обсуждение

Первостепенное значение имеет потенциальный социально-экономический эффект. К имеющим меньшее значение относят следующие показатели:

- NPV;
- индекс внутренней нормы доходности;
- прирост ценности лесопромышленного комплекса (в рамках структурных подразделений);
- степень развития импортозамещающих кластеров.

Важным является вопрос и о состоянии радиоэкологии и, как следствие, о рекультивации территории. Отмечено значение государственных институтов в поддержке дорогостоящих инвестиционных проектов импортозамещения [9–13].

Несмотря на прогресс в становлении кластерного подхода, в нем отмечаются существенные недостатки, в частности не решены вопросы, связанные с недостаточным финансовым обеспечением, формированием адекватной ценовой политики [14] и созданием эффективного проектного менеджмента в сфере права и нормативной документации.

В целях эффективности применения кластерного подхода к развитию лесной отрасли целесообразно представить следующие важные факторы:

- 1) наличие инвестиционной активности в Уральском регионе по лесному сектору;
- 2) высокое качество человеческого капитала и природных ресурсов, входящих в состав кластера.

Качество человеческого капитала представляет собой совокупность знаний, умений, навыков, необходимых для удовлетворения многообразных потребностей каждого человека и общества в целом. Экономические проблемы лесного сектора прямо зависят от состояния бывших лесных поселков и демонстрируют качественное ухудшение трудовых ресурсов. Это связано с обесцениванием, «девальвацией» человеческого капитала в связи с закрытием хозяйствующих субъектов лесной отрасли. К настоящему времени наблюдается прекращение инвестирования человеческого капитала и его утечка. Воспроизводственный процесс развития человеческого капитала прерван.

Проблемы, которые сегодня существуют в миграционной и промышленной политике государства, препятствуют решению вопроса «брошенных» поселков. Ключевой проблемой становится поиск механизмов восстановления человеческого капитала. Впервые его применили зарубежные экономисты в середине XX в. Специалисты развивали эту идею с 1964 г., обосновывая эффективность вложений в человеческий капитал и формулируя экономический подход к этому вопросу.

Главным требованием к развитию человеческого капитала в цифровой цивилизации является скорость трансформации и значение лесных ресурсов в социотехнологической инфраструктуре. Вопросы усиления управления природоохранной деятельностью на основе кластерного инновационного подхода длительное время находятся в центре внимания ученых [15].

Важное значение приобретает определение коэффициента интенсивности локализации $K_{и.л}$ по объектам исследования, на основе которого можно установить значимость кластерного подхода в формировании стратегии развития лесопромышленного комплекса региона

$$K_{и.л} = \frac{K_{л}^{об}}{K_{л}^з},$$

где $K_{л}^{об}$ — коэффициент локализации по обороту отрасли в регионе с учетом инновационной составляющей;

$K_{л}^з$ — коэффициент локализации по числу занятых в отрасли в регионе.

В результате сопоставления данных коэффициентов локализации выстраивается матрица (рисунок).

Общий коэффициент локализации	Зона недостаточной локализации ресурсов	Зона высокой локализации
	Зона низкой локализации	Зона недостаточной локализации результатов

Коэффициент локализации человеческого капитала

Выделение зоны в матрице оценки эффективности динамики развития кластерных образований
 Zone in the matrix for assessing the efficiency of cluster development dynamics

Большое значение имеет установление уровня интенсивности локализации для уточнения точек роста. По полученным данным, определяется размер недостаточной локализации ресурсов,

акцентируя внимание на индексе интенсивности локализации $K_{и.л}$ по полученным кластерам и выделенным секторам.

Рассмотрим значения индексов интенсивности локализации по инновационным лесопромышленным кластерам Свердловской области, выполненный нами за период 2019–2021 гг.:

1) лесопромышленный инновационный кластер Туринского района

2019 г. $K_{и.л} = 0,89$;

2020 г. $K_{и.л} = 0,98$;

2021 г. $K_{и.л} = 1,11$;

2) лесопромышленный инновационный кластер Ново-Лялинского района

2019 г. $K_{и.л} = 0,95$;

2020 г. $K_{и.л} = 0,99$;

2021 г. $K_{и.л} = 1,14$;

3) лесопромышленный инновационный кластер Таборинского района

2019 г. $K_{и.л} = 0,97$;

2020 г. $K_{и.л} = 0,99$;

2021 г. $K_{и.л} = 1,19$.

Определение коэффициентов общей локализации осуществляется по объектам исследования. При этом устанавливается значение кластерного подхода к формированию стратегии развития лесопромышленного комплекса Свердловской области. Полученные данные подтверждают эффективность кластерного подхода, поскольку среди исследуемых секторов прослеживается опережающая эффективность, выявленная по результатам за 2019–2021 гг.

Важным фактором является социально-экономическая выгода для региона от организации кластера вследствие увеличения количества налогоплательщиков и роста налогооблагаемой базы.

С помощью «метода аналитических сетей (МАС)», можно учесть такие факторы, как выгода, возможности, издержки и риски, оценить приоритеты издержек, возможностей, рисков, государственных затрат и обеспеченности источниками финансирования» [7].

В большинстве российских регионов имеются объективные предпосылки для расширенного формирования кластеров на уровне муниципальных районов в лесном секторе экономики. При этом предназначение региональных органов власти должно заключаться в активном содействии кластерной политике на муниципальном уровне.

В дополнение отметим значимость развития эколого-биотехнологического кластера «Урал — Евразия», развитие ООО «Свеза Уральский» как базиса перспективного развития региона на основе глубокой переработки сырья и воспроизводства ведущих структур фанерно-плитной продукции.

Для определения динамики промышленного кластера конкретной области лесного сектора не-

обходимо установить два параметра в отношении исследуемых областей [15]:

– область опережающей эффективности;

– область отстающей эффективности.

По полученным данным определяется размер недостаточной локализации ресурсов.

Важным фактором является и определяющая роль промышленного кластера региона как отправной точки притока инвестиций и создания конкурентных преимуществ [16]. На основе реализации кластерной политики возможна трансформация изменения структуры отдельных регионов в отраслевом контексте и решение проблемы в части прав собственности в области лесопользования конкретной области лесных насаждений.

Инновационный тип кластера [16–19], безусловно, должен соответствовать главному критерию реализации кластерных проектов. Результаты деятельности инновационных кластеров могут иметь самое разное материальное или информационное воплощение: от новых научных теорий и регионально значимых объектов по комплексному использованию сырья. Как пример, представим объект ООО «Тайрику-Игирма-Групп», выпускающего высокомаржинальную продукцию глубокой деревообработки, имеющего длительную историю и экономически эффективный результат. Необходимо придавать первоочередное социальным факторам смежных отраслей [20–26]. Вопросы оценки эффективности кластеров как лесопромышленного, так и агропромышленного комплексов не потеряли своей актуальности [27, 28].

Важное значение имеет формирование кластера инновационного типа в других областях лесопромышленного комплекса, представленных развитой инфраструктурой, интегрированных структур и возможностью трансфера прогрессивных технологий [29–32]. Кластерный подход к развитию лесной отрасли поможет решить проблемы быстрого формирования и развития импортозамещающих производств.

Выводы

Выполненное исследование показало, что при определении динамики развития промышленного кластера конкретной области лесного сектора необходимо использовать два параметра: область опережающей эффективности и область отстающей эффективности. На основании полученных данных устанавливается размер недостаточной локализации ресурсов. Реализация кластерной политики может привести к трансформации структуры регионов в отраслевом аспекте и оказать влияние на решение проблемы в части прав собственности в области лесопользования. Результаты деятельности инновационных кластеров могут иметь разное материальное и информационное

воплощение: от новых научных территорий до регионально значимых объектов по комплексному использованию сырья.

Инновационный тип кластера должен соответствовать главному критерию реализации кластерных проектов.

Совершенствование оценки формирования инновационного лесохозяйственного кластера будет содействовать экономическому росту лесных производственных кластеров и диверсификации экономики в результате повышения конкурентоспособности предприятий-поставщиков оборудования и предприятий, предоставляющих специализированные услуги проведения научно-исследовательской деятельности.

Список литературы

- [1] Головин В.А. Анализ факторов и потенциала развития экономических кластеров республики Марий Эл по видам экономической деятельности // Экономика региона, 2017. Т. 13. Вып. 4. С. 1068–1079.
- [2] Боброва С.Я., Жукова Н.В., Ярова В.В. Актуальные вопросы формирования кластеров как инструмента повышения конкурентоспособности региона // Фундаментальные исследования, 2017. № 12. С. 508–509.
- [3] Бутко Г.П. Конкуренция: теория, методология, практика. Екатеринбург: ООО «УМК», 2012. 342 с.
- [4] Бутко Г.П., Зотов Ф.П. Проблемы кластерного подхода в промышленности // Агротранспортная политика России, 2016. № 7. С. 55–59.
- [5] Астапов К.Л., Жданов Д.И. Стратегические инициативы развития стартапов в сфере информационных технологий России // Экономика промышленности, 2022. Т. 15. № 1. С. 78–92.
- [6] Поконов А.А. Методические вопросы формирования стратегии технологического развития предприятий лесопромышленного комплекса в регионе // Инновации и инвестиции, 2016. № 11. С. 143–146.
- [7] Пинягина Н.Б., Кравченко Р.В. Условия и перспективы создания в Архангельской области лесного территориально-производственного кластера // Вестник МГУЛ – Лесной вестник, 2014. № 3. С. 111–119.
- [8] Мехренцев А.В., Бутко Г.П., Герц Э.Ф. О рациональной производственной структуре регионального лесопромышленного комплекса Свердловской области в контексте цифровых технологий // Системы. Методы. Технологии, 2021. № 1 (49). С. 72–77.
- [9] Петрова Е.М. Актуальные проблемы развития сельских территорий в контексте муниципальной реформы // Современные гуманитарные исследования, 2011. № 6. С. 33–36.
- [10] Портер М.Э. Конкуренция. М.: Вильямс, 2022. 496 с.
- [11] Таран Е.Г. Роль малого предпринимательства в развитии муниципальных образований: автореф. дис. ... канд. экон. наук. Ставрополь, 2015. 19 с.
- [12] Агаларова Е.Г. Кластерный подход как инструмент устойчивого развития сельских территорий // Молодой ученый, 2012. № 4. С. 92–95.
- [13] Вершинина Д. Умножение кластера // Наука Урала, 2019. № 7. С. 5.
- [14] Резанов К.В. Методологический подход к обеспечению устойчивого развития кластерной модели лесного комплекса региона // Управление экономическими системами, 2016. № 4 (86). С. 2.
- [15] Бутко Г.П., Поротников П.А., Велиева О.В. Управление природоохранной деятельностью на основе кластера инновационного типа // Известия УрГЭУ, 2010. № 2 (28). С. 162–168.
- [16] Погодина Т.В., Задорова Т.В. Оценка инвестиционного потенциала кластеров // Экономический анализ, 2014. № 24. (375). С. 321–329.
- [17] Яковенко Н.В., Бутко Г.П., Мехренцев А.В. Типологические особенности инновационного развития ЛПК // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика, 2022. Т. 10. № 2(57). С. 124–138.
- [18] Пак О.Б., Меньшикова М.А. Исследование понятия инновационной среды и задачи по управлению // Механизмы информационного обеспечения устойчивого развития экономики / под ред. М.А. Меньшиковой, М.Д. Джамалдиновой: сб. статей ежегодной регион. межвуз. науч.-практ. конф. преподавателей, аспирантов и магистрантов кафедры экономики, Москва, 28 января 2021 г. М.: Научный консультант, 2021. С. 10–14.
- [19] Малютина Л.В., Бутко Г.П., Поротников П.А. Экономический механизм устойчивого управления лесами на основе инновационного развития // Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий: социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса: материалы XIII Междунар. науч.-тех. конф., Екатеринбург, 02–04 февраля 2021 г. Екатеринбург: Изд-во Уральского государственного лесотехнического университета, 2021. С. 590–595.
- [20] Меделяева З.П., Босая И.Г., Ляшко С.Н. Социально-экономические кластеры как фактор комплексного развития региона // Международный сельскохозяйственный журнал, 2015. № 6. С. 52–55.
- [21] Сараджева О.В. Совершенствование механизма инновационного развития региона // Образование. Наука. Научные кадры, 2011. № 4. С. 148–149.
- [22] Шарапова В.М., Шарапова Н.В., Шарапов Ю.В. Социальные факторы, сдерживающие развитие сельских территорий // Международный сельскохозяйственный журнал, 2020. № 6 (378). С. 49–52.
- [23] Томилина Ю.В. Кластерный подход к повышению конкурентоспособности Орловской области // Регион: системы, экономика, управление, 2013. № 1 (20). С. 42–47.
- [24] Боровикова Н.В. Приоритетные направления развития промышленности Ставропольского края // Вестник Института дружбы народов Кавказа (Теория экономики и управления народным хозяйством). Экономические науки, 2016. № 4 (40). С. 9.
- [25] Кундиус В.А., Пецух Н.И., Домникова Е.Ю., Харченко А.Н. Разработка методики и расчеты доходов домашних хозяйств, микрокластер сельских территорий // Вестник алтайской науки, 2014. № 1 (19). С. 80–85.
- [26] Prokhorova V.V., Artemova E.I., Miroshnichenko M.B. Cluster technology as a basis for the competitive development of industries in Russia // Revista de la Universidad del Zulia, 2020, t. 11, no. 29, pp. 265–275.
- [27] Головин В.А. Оценка и повышение экономической эффективности агропромышленного кластера Республики Марий Эл. Йошкар-Ола: Марийский гос. ун-т, 2019. 187 с.
- [28] Головин В.А., Смирнов А.А. Стратегические мероприятия по повышению эффективности развития регионального агропромышленного кластера // Вестник Марийского государственного университета. Серия «Сельскохозяйственные науки. Экономические науки», 2020. Т. 6. № 3. С. 351–358.

- [29] Бузкова А.А. Управление трансфером технологических инноваций: отраслевая цепочка ценностей // Проблемы теории и практики управления, 2021. № 1. С. 111–119.
- [30] Иванин П.И. Гармоничный инновационный менеджмент. М.: Либроком, 2021. 140 с.
- [31] Игнатенко К.О., Кончаков Д.В. Реализация эффективной конкурентной политики ЕС в сфере инноваций посредством общего интеллектуального права // Законы России: опыт, анализ, практика, 2019. № 2. С. 19–23.
- [32] Зверева Т.М. Необходимость обновления форм и методов управления в условиях использования инновационного менеджмента // Электронный научный журнал, 2020. № 1(30). С. 67–70.

Сведения об авторах

Бутко Галина Павловна [✉] — д-р экон. наук, профессор кафедры информационных технологий и статистики ФГБОУ ВО «Уральский государственный экономический университет», gpbuto@mail.ru

Меньшикова Маргарита Аркадьевна — д-р экон. наук, профессор кафедры экономики ФГБОУ ВО «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза летчика-космонавта А.А. Леонова», lvn-3@yandex.ru

Мехренцев Андрей Вениаминович — канд. техн. наук, профессор, зав. кафедрой технологии организации лесопромышленного производства ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», mehrenzev@mail.ru

Тихомиров Евгений Александрович — канд. экон. наук, доцент кафедры экономики и управления МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), tihomirov@mgul.ac.ru

Раменская Людмила Александровна — канд. экон. наук, доцент кафедры корпоративного управления ФГБОУ ВО «Уральский государственный экономический университет», ramen_lu@mail.ru

Поротников Павел Анатольевич — канд. экон. наук, доцент, кафедра социально-экономических дисциплин, ФГКОУ ВО «Уральский юридический институт Министерства внутренних дел Российской Федерации», pekin-auto@mail.ru

Поступила в редакцию 05.10.2022.

Одобрено после рецензирования 21.08.2023.

Принята к публикации 27.09.2023.

ECONOMIC ASSESSMENT OF INNOVATIVE FOREST CLUSTER FORMATION IN SVERDLOVSK REGION

**G.P. Butko^{1✉}, M.A. Menshikova², A.V. Mekhrentsev³,
E.A. Tikhomirov⁴, L.A. Ramenskaya¹, P.A. Porotnikov⁵**

¹Ural State University of Economics, 62/45, 8 Marta/Narodnaya Volya st., 620144, Ekaterinburg, Russia

²Technological University of twice Hero of the Soviet Union, Cosmonaut A.A. Leonov, 42, Gagarina st., 141070, Korolev, Russia

³Ural State Forestry Engineering University, 37, Sibirsky Trakt st., 620100, Ekaterinburg, Russia

⁴BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

⁵Ural Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation, 66, Korepina st., 620057, Ekaterinburg, Russia

gpbuto@mail.ru

The issues of forming an industrial cluster for the rational and sustainable use of raw materials are considered at the regional level. The role of state institutions in supporting expensive import substitution investment projects was noted. At the same time, the issue of the state of ecology and, as a consequence, the reforestation of the territory is important. Alongside with the problem of the cluster approach formation, there are also quite significant shortcomings, which are based on unresolved issues related to financial investments and their insufficiency, the formation of an adequate pricing policy and the creation of effective project management in the field of legal support and regulatory documentation. To determine the dynamics of an industrial cluster of a specific area of the forest sector, it is necessary to set 2 parameters in relation to the studied areas: the area of advanced efficiency; the area of lagging efficiency. For the first time, two components necessary for the creation of a cluster are presented: economic and organisational, as well as in addition to them raw materials, human resources, scientific and technological potential. The efficiency of the industrial forest cluster and the expediency of its consideration from the position of resource endowment and the degree of localisation in the economic space of the region are shown, which, in contrast to existing approaches, allows us to formulate more clearly the priorities of the application of methods for identifying and assessing the efficiency of economic cluster development. The article assesses the possibility of investment inflow and, in general, the innovative capabilities of structural sub-branches of the forest sector.

Keywords: protection, use, forest management, protection and reproduction of forests, environmental and economic problems, forest management, effective methods of logging, reforestation, sustainable development

Suggested citation: Butko G.P., Menshikova M.A., Mekhrentsev A.V., Tikhomirov E.A., Ramenskaya L.A., Porotnikov P.A. *Ekonomicheskaya otsenka formirovaniya innovatsionnogo lesnogo klastera v Sverdlovskoy oblasti* [Economic assessment of innovative forest cluster formation in Sverdlovsk region]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 6, pp. 66–74. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-66-74

References

- [1] Golovin V.A. *Analiz faktorov i potentsiala razvitiya ekonomicheskikh klasterov respubliki Mariy El po vidam ekonomicheskoy deyatel'nosti* [Analysis of factors and potential for the development of economic clusters of the Mari El Republic by type of economic activity]. *Ekonomika regiona* [Regional Economics], 2017, v. 13, iss. 4, pp. 1068–1079.
- [2] Bobrova S.Ya., Zhukova N.V., Yarovova V.V. *Aktual'nye voprosy formirovaniya klasterov kak instrumenta povysheniya konkurentosposobnosti regiona* [Topical issues of cluster formation as a tool for increasing the competitiveness of the region]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental Research], 2017, no. 12, pp. 508–509.
- [3] Butko G.P. *Konkurentsia: teoriya, metodologiya, praktika* [Competition: theory, methodology, practice]. Ekaterinburg: UMK LLC, 2012, 342 p.
- [4] Butko G.P., Zotov F.P. *Problemy klasterного podkhoda v promyshlennosti* [Problems of the cluster approach in industry]. *Agroprodovol'stvennaya politika Rossii* [Agricultural Policy of Russia], 2016, no. 7, pp. 55–59.
- [5] Astapov K.L., Zhdanov D.I. *Strategicheskie initsiativy razvitiya startapov v sfere informatsionnykh tekhnologiy Rossii* [Strategic initiatives for the development of startups in the field of information technologies in Russia]. *Ekonomika promyshlennosti* [Economics of Industry], 2022, v. 15, no. 1, pp. 78–92.
- [6] Pokonov A.A. *Metodicheskie voprosy formirovaniya strategii tekhnologicheskogo razvitiya predpriyatiy lesopromyshlennogo kompleksa v regione* [Methodological issues of forming a strategy for the technological development of timber industry enterprises in the region]. *Innovatsii i investitsii* [Innovations and investments], 2016, no. 11, pp. 143–146.
- [7] Pinyagina N.B., Kravchenko R.V. *Usloviya i perspektivy sozdaniya v Arkhangel'skoy oblasti lesnogo territorial'no-proizvodstvennogo klastera* [Conditions and prospects for creation in the Arkhangel'sk region of the forest territorial-production cluster]. *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*, 2014, no. 3, pp. 111–119.
- [8] Mekhrentsev A.V., Butko G.P., Gerts E.F. *O ratsional'noy proizvodstvennoy strukture regional'nogo lesopromyshlennogo kompleksa Sverdlovskoy oblasti v kontekste tsifrovyykh tekhnologiy* [On the rational production structure of the regional timber industry complex of the Sverdlovsk region in the context of digital technologies]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2021, no. 1 (49), pp. 72–77.
- [9] Petrova E.M. *Aktual'nye problemy razvitiya sel'skikh territoriy v kontekste munitsipal'noy reformy* [Current problems of development of rural areas in the context of municipal reform]. *Sovremennye gumanitarnye issledovaniya* [Modern Humanitarian Research], 2011, no. 6, pp. 33–36.
- [10] Porter M.E. *Konkurentsia* [Competition]. Moscow: Williams, 2022, 496 p.
- [11] Taran E.G. *Rol' malogo predprinimatel'stva v razvitii munitsipal'nykh obrazovaniy* [The role of small business in the development of municipalities]. *Dis. Cand. Sci. (Econ.)*. Stavropol, 2015. 19p.
- [12] Agalarova E.G. *Klasterный podkhod kak instrument ustoychivogo razvitiya sel'skikh territoriy* [Cluster approach as a tool for sustainable development of rural areas]. *Molodoy uchenyy* [Young scientist], 2012, no. 4, pp. 92–95.
- [13] Vershinina D. *Umnozhenie klastera* [Cluster multiplication]. *Nauka Urala* [Science of the Urals], 2019, no. 7, p. 5.
- [14] Rezanov K.V. *Metodologicheskyy podkhod k obespecheniyu ustoychivogo razvitiya klasternoy modeli lesnogo kompleksa regiona* [Methodological approach to ensuring sustainable development of the cluster model of the regional forest complex]. *Upravlenie ekonomicheskimi sistemami* [Management of economic systems], 2016, no. 4 (86), p. 2.
- [15] Butko G.P., Porotnikov P.A., Velieva O.V. *Upravlenie prirodookhrannoy deyatel'nost'yu na osnove klastera innovatsionnogo tipa* [Management of environmental activities based on an innovation-type cluster]. *Izvestiya UrGEU* [Izvestia USUE], 2010, no. 2 (28), pp. 162–168.
- [16] Pogodina T.V., Zadorova T.V. *Otsenka investitsionnogo potentsiala klasterov* [Assessment of the investment potential of clusters]. *Ekonomicheskyy analiz* [Economic analysis], 2014, no. 24 (375), pp. 321–329.
- [17] Yakovenko N.V., Butko G.P., Mekhrentsev A.V. *Tipologicheskie osobennosti innovatsionnogo razvitiya LPK* [Typological features of innovative development of timber industry]. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy KhKhI veka: teoriya i praktika* [Current directions of scientific research of the 21st century: theory and practice], 2022, t. 10, no. 2(57), pp. 124–138.
- [18] Pak O.B., Men'shikova M.A. *Issledovanie ponyatiya innovatsionnoy sredy i zadachi po upravleniyu* [Study of the concept of innovation environment and management tasks]. *Mekhanizmy informatsionnogo obespecheniya ustoychivogo razvitiya ekonomiki: sbornik statey ezhegodnoy regional'noy mezhvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii prepodavateley, aspirantov i magistrantov kafedry ekonomiki* [Mechanisms of information support for sustainable development of the economy: collection of articles of the annual regional interuniversity scientific and practical conference of teachers, graduate students and undergraduates of the Department of Economics, Moscow, January 28, 2021]. Ed. M.A. Menshikova, M.D. Dzhamaaldinova. Moscow: Scientific consultant, 2021, pp. 10–14.
- [19] Maljutina L.V., Butko G.P., Porotnikov P.A. *Ekonomicheskyy mekhanizm ustoychivogo upravleniya lesami na osnove innovatsionnogo razvitiya* [Economic mechanism for sustainable forest management based on innovative development]. *Effektivnyy otvet na sovremennyye vyzovy s uchedom vzaimodeystviya cheloveka i prirody, cheloveka i tekhnologiy: sotsial'no-ekonomicheskie i ekologicheskie problemy lesnogo kompleksa: materialy XIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Effective response to modern challenges, taking into account the interaction of man and nature, man and technology: socio-economic and environmental problems of the forestry complex: materials of the XIII International Scientific and Technical Conference], Ekaterinburg, February 02–04 2021 Ekaterinburg: Ural State Forestry University, 2021. pp. 590–595.
- [20] Medelyaeva Z., Bosaya I., Lyashko S. *Sotsial'no-ekonomicheskie klasterы kak faktor kompleksnogo razvitiya regiona* [Socio-economic clusters as a factor in the complex development of the region]. *Mezhdunarodnyy sel'skokhozyaystvennyy zhurnal* [International Agricultural J.], 2015, no. 6, pp. 52–55.
- [21] Saradzhava O.V. *Sovershenstvovanie mekhanizma innovatsionnogo razvitiya regiona* [Improving the mechanism of innovative development of the region]. *Obrazovanie. Nauka. Nauchnye kadry* [Education. The science. Scientific personnel], 2011, no. 4, pp. 148–149.

- [22] Sharapova V.M., Sharapova N.V., Sharapov Yu.V. *Sotsial'nye faktory, sderzhivayushchie razvitie sel'skikh territoriy* [Social factors constraining the development of rural areas]. *Mezhdunarodnyy sel'skokhozyaystvennyy zhurnal* [International Agricultural J.], 2020, no. 6 (378), pp. 49–52.
- [23] Tomilina Yu.V. *Klasternyy podkhod k povysheniyu konkurentosposobnosti Orlovskoy oblasti* [Cluster approach to increasing the competitiveness of the Oryol region]. *Region: sistemy, ekonomika, upravlenie* [Region: systems, economics, management], 2013, no. 1 (20), pp. 42–47.
- [24] Borovikova N.V. *Prioritetnye napravleniya razvitiya promyshlennosti Stavropol'skogo kraya* [Priority directions for the development of industry in the Stavropol Territory]. *Vestnik Instituta druzhby narodov Kavkaza (Teoriya ekonomiki i upravleniya narodnym khozyaystvom). Ekonomicheskie nauk* [Bulletin of the Institute for Friendship of Peoples of the Caucasus (Theory of Economics and National Economy Management). Economic Sciences], 2016, no. 4 (40), p. 9.
- [25] Kundius V.A., Petsukh N.I., Domnikova E.Yu., Kharchenko A.N. *Razrabotka metodiki i raschety dokhodov domashnikh khozyaystv, mikroklaster sel'skikh territoriy* [Development of methods and calculations of household income, microcluster of rural areas]. *Vestnik altayskoy nauki* [Bulletin of Altai Science], 2014, no. 1 (19), pp. 80–85.
- [26] Prokhorova V.V., Artemova E.I., Miroshnichenko M.B. Cluster technology as a basis for the competitive development of industries in Russia. *Revista de la Universidad del Zulia*, 2020, t. 11, no. 29, pp. 265–275.
- [27] Golovin V.A. *Otsenka i povyshenie ekonomicheskoy effektivnosti agropromyshlennogo klastera Respubliki Mariy El* [Assessment and improvement of economic efficiency of the agro-industrial cluster of the Republic of Mari El]. *Yoshkar-Ola: Mari State Univ.*, 2019, 187 p.
- [28] Golovin V.A., Smirnov A.A. *Strategicheskie meropriyatiya po povysheniyu effektivnosti razvitiya regional'nogo agropromyshlennogo klastera* [Strategic measures to improve the efficiency of development of the regional agro-industrial cluster]. *Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Sel'skokhozyaystvennye nauki. Ekonomicheskie nauki»* [Bulletin of the Mari State University. Series «Agricultural Sciences. Economic Sciences»], 2020, v. 6, no. 3, pp. 351–358.
- [29] Buzkova A.A. *Upravlenie transferom tekhnologicheskikh innovatsiy: otraslevaya tseppochka tsennostey* [Managing the transfer of technological innovations: industry value chain]. *Problemy teorii i praktiki upravleniya* [Problems of theory and practice of management], 2021, no. 1, p. 120.
- [30] Ivanin P.I. *Garmonichnyy innovatsionnyy menedzhment* [Harmonious innovative management]. Moscow: Librocom, 2021, 140 p.
- [31] Ignatenko K.O., Konchakov D.V. *Realizatsiya effektivnoy konkurentnoy politiki ES v sfere innovatsiy posredstvom obshchego intellektual'nogo prava* [Implementation of effective EU competition policy in the field of innovation through common intellectual law]. *Zakony Rossii: opyt, analiz, praktika* [Laws of Russia: experience, analysis, practice], 2019, no. 2, p. 23.
- [32] Zvereva T.M. *Neobkhodimost' obnoveniya form i metodov upravleniya v usloviyakh ispol'zovaniya innovatsionnogo menedzhmenta* [The need to update forms and methods of management in the context of using innovative management]. *Elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Electronic scientific journal], 2020, no. 1 (30), pp. 67–70.

Authors' information

Butko Galina Pavlovna✉ — Dr. Sci. (Economic), Professor of the Department of Economics of the Ural State University of Economics, gpbuto@mail.ru

Men'shikova Margarita Arkad'evna — Dr. Sci. (Economic), Professor of the Department of Economic, Technological University of twice Hero of the Soviet Union, Cosmonaut A.A. Leonov, lvn-3@yandex.ru

Mekhrentsev Andrey Veniaminovich — Cand. Sci. (Tech.), Professor of the Ural State Forestry Engineering University, mecrenzev@mail.ru

Tikhomirov Evgeniy Aleksandrovich — Cand. Sci. (Economic), Associate Professor of the Department of Economics and Management, of the BMSTU (Mytishchi branch), tikhomirov@mgul.ac.ru

Ramenskaya Lyudmila Aleksandrovna — Cand. Sci. (Economic), Associate Professor of the Department of Corporate Governance Ural State University of Economics, ramen_lu@mail.ru

Porotnikov Pavel Anatol'evich — Cand. Sci. (Economic), Associate Professor of the Department of Social and Economic Disciplines, Ural Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation, pekin-auto@mail.ru

Received 05.10.2022.

Approved after review 21.08.2023.

Accepted for publication 27.09.2023.

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

РЕКУПЕРАЦИЯ ЛИСТОВОГО ОПАДА В КОРМОВЫЕ ПРОДУКТЫ С ВЫСОКОЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ЦЕННОСТЬЮ

А.Н. Иванкин[✉], А.Н. Веревкин

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

aivankin@mgul.ac.ru

Изложено описание процесса биотрансформации *in vitro* листового опада в присутствии дрожжевых культур с целью получения продукта кормового назначения. Показано, что рекуперация растительного сырья, в качестве которого использовали смесь опавших листьев тополя бальзамического *Populus balsamifera* L. и березы повислой *Betula pendula*, в присутствии 10...15 % к массе сырья отходов пивоваренного производства — дрожжевых культур *Saccharomyces carlsbergensis* 16-й генерации позволяет путем твердофазного ферментирования в течение 6 сут получать биоэффективные добавки кормового назначения. Установлено, что для балансирования конечного состава продукта в исходную смесь целесообразно добавлять боенскую кровь. Показано, что процесс биотехнической переработки листового сырья с помощью дрожжей сопровождается умеренной биотрансформацией лигнинных веществ с уменьшением их содержания в конечном продукте, трансформацией углеводных компонентов, а также увеличением содержания белка. Приведен аминокислотный состав белковой части ферментированного продукта и показано, что в нем содержатся все эссенциальные аминокислоты, необходимые для полноценного развития живого организма. Установлено, что в продукте, кроме связанных в структуре белка аминокислот, содержится также незначительное количество свободных аминокислот. Изучен базовый элементный состав зольных компонентов субстратов до и после культивирования и отмечено, что количество макро- и микроэлементов соответствует безопасному уровню их содержания в объектах природного происхождения. Установлены основные физико-химические показатели качества продукта, определяющие его эффективность использования в кормовых целях. Проведены предварительные испытания полученного продукта и показано, что ферментированная дрожжами масса листового сырья после сушки может использоваться в качестве высокоусвояемой добавки для корма поросят, а также может служить питательной основой для получения биоэффективных кормов при выращивании других сельскохозяйственных животных.

Ключевые слова: растительное сырье, листовый опад, пивные дрожжи, биодеградация, гидролиз, корма

Ссылка для цитирования: Иванкин А.Н., Веревкин А.Н. Рекуперация листового опада в кормовые продукты с высокой биологической ценностью // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 6. С. 75–83. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-75-83

Растительный мир представляет собой важный сырьевой источник, позволяющий достаточно легко получать необходимые компоненты пищевых систем в силу своего разнообразия, относительно простых условий произрастания и больших объемов сельскохозяйственного производства. Значительная часть продукции растениеводства направляется на корма для выращивания продуктивных животных.

Одним из основных факторов успешного развития животноводства является укрепление и расширение кормовой базы, создание экологически чистых кормовых добавок, содержащих питательные вещества с высокой усвояемостью, активно стимулирующих нормальный рост и интенсивное развитие [1, 2].

Большинство кормов, используемых для питания сельскохозяйственных животных, не содержит достаточного количества полноценного

белка. Его дефицит покрывается увеличением содержания в рационах животных растительного протеина сельскохозяйственных культур, в первую очередь за счет использования зерна [3, 4].

В рецептурах современных комбикормов доля зерновых может составлять 60...80 %. Использование такого количества зерна нерационально и приводит к дисбалансу белкового и углеводного компонентов рационов, что становится причиной снижения продуктивности, потери живой массы, вынужденной выбраковки животных, а также возникновению их бесплодия.

Решить проблему можно путем снижения использования в кормах зерновых компонентов и обогащения рационов белком животного происхождения или белком, полученным путем микробного синтеза.

Корма сельскохозяйственных животных содержат в своем составе влагу, причем если в травяных кормах (сено, солома) влажность составляет до 15 %, в зеленых кормах она достигает

60...85 %, а в корнеплодах ее содержание может составлять 90 %. Чем больше влагосодержание в корме — тем ниже его питательность. Высокое содержание влаги также отрицательно сказывается на продолжительности товарного хранения [5, 6].

Для получения кормовых добавок определенный интерес представляют практически неограниченные ресурсы древесной фитомассы.

Листья древесных пород при влажности 62...72 % содержат 2,5...7,5 % белка, до 3 % жировых липидов, 4...8 % сырой клетчатки, 13...22 % безазотистых экстрактивных веществ и 1,5...3,5 % золы. Переваримость органического вещества фитомассы из листьев осины, березы, ивы и липы составляет более 63 %.

В фитомассе содержатся разные по природе химические компоненты. Состав зеленой массы, прежде всего содержание в ней необходимых для питания витаминов, белков, полисахаров, зависит от многих факторов, в том числе от видовых характеристик растения, его возраста, климатических условий произрастания, состава почвы, времени суток, количества осадков, сезонных колебаний температуры, освещенности и других факторов. Так, например, содержание (мг/кг сухого вещества) неорганических ионов металлов в листе и хвое в зависимости от региона произрастания, может составлять [7]: Ca — 0,5...1,5; Mg — 5...7; K — 2...4; Na — 3...7; Fe — 1,5...6,5; Mn — 1...3.

Динамика изменения содержания полезных компонентов в растительном сырье существенно различается. Зимой происходит накопление питательных веществ в растениях, весной с развитием вегетации их содержание варьирует и может накапливаться в оконечных органах — листе. Считается, что наибольшее количество питательных веществ содержится именно в листьях лесных культур, кроме того, здесь имеется значительное количество перевариваемого белка.

Для оценки пригодности такого растительного материала в качестве корма важен учет наличия в нем и протеина, и нуклеиновых кислот, и клетчатки, и других органических регуляторных соединений [8]. Биологическая ценность белка зависит прежде всего от содержания в нем незаменимых аминокислот. Однако избыточное содержание какой-либо минорной аминокислоты может вызывать нарушение биохимических процессов развития животных и даже угнетение их роста. Для эффективного потребления белка в составе кормового рациона необходимо определенное соотношение всех 20 заменимых и незаменимых аминокислот, т. е. должна обеспечиваться сбалансированность в соотношениях с другими аминокислотами. Недостаток какой-либо незаменимой аминокислоты в используемом белковом корме

животных неизбежно снижает эффективность потребления других аминокислот в рационе, и это уменьшает эффективность такого рациона [9].

Учитывая биохимический состав растительных отходов, прежде всего в силу значительных объемов опавших листьев березы (опада), данный вид природного сырья следует рассматривать как достаточно перспективное сырье для получения с его помощью таких полезных продуктов, как белковые кормовые добавки, которые можно получать на их основе путем биоконверсии [10].

Древесная зелень является источником большого количества экстрактивных веществ, которые могут относительно легко высвободиться в процессе пищеварения в желудочно-кишечном тракте сельскохозяйственных животных. Среди веществ, экстрагируемых растворителями, имеются терпеноиды, каротиноиды, фосфолипиды, зеленые пигменты и витамины. Компоненты клеточных стенок листового опада представляют меньший интерес с точки зрения их биодоступности [11–13].

Основной компонентный состав (%) древесной зелени (березы, тополя) может быть представлен следующим образом: содержание целлюлозы — 7...10; пентозанов — 1...2; лигнина — 9...20; золы — 2...4; влаги — до 75...90 [11]. Целлюлоза и лигнин не относятся к компонентам с высокой биологической ценностью, однако остальные составляющие зеленой фитомассы обеспечивают ее биодоступность.

Несмотря на достаточно благоприятный общий химический состав лесной фитомассы, существуют возможные методы повышения ее биологической ценности путем микробиологической трансформации *in vitro*.

Известно, что достаточно активными биотрансформаторами растительных отходов древесного происхождения являются грибные культуры [14]. Грибы — это основные разрушители растительных остатков в лесу. Особое место среди множества грибов занимают представители класса *Basidiomycetes*, в частности грибы рода *Pleurotus* [15]. Продукенты имеют мощную ферментативную систему (целлюлазы и оксидоредуктазы), которая способна расщеплять целлюлозу и лигнин, что позволяет использовать грибную биомассу для биодеструкции растительных отходов с получением белкового кормового продукта. В процессе конверсии субстрата продукенты в первую очередь утилизируют экстрактивные вещества и легкогидролизуемые полисахариды, количество которых может снижаться на 30...45 % с общим уменьшением содержания полисахаридов на 20 %, лигниновых веществ — на 10...15 % [16, 17].

Ферментные системы микроорганизмов достаточно универсальны. Ранее в своих работах мы

показали возможность использования дрожжевых культур для биотрансформации субстратов растительного и животного происхождения [18–20].

Цель работы

Цель работы — разработка технологии получения кормовой добавки из листового опада с использованием отходов дрожжевых культур.

Материалы и методы

В качестве сырьевого субстрата для биодеструкции использовали осеннюю смесь опавших листьев тополя бальзамического *Populus balsamifera* L. и березы повислой *Betula pendula* в соотношении 1:1.

Модификатором служили отходы пивоваренных дрожжевых культур *Saccharomyces carlsbergensis* 16-й генерации.

Перед культивированием субстраты измельчали на грануляторе до размера частиц 2...5 мм, доводили влагосодержание до уровня 70 % путем добавления необходимого количества воды питьевой. Культивирование проводили твердофазным способом во вращающейся емкости для обеспечения умеренного перемешивания. Засев дрожжей осуществляли путем внесения в смесь листового опада 10 % масс. суспензии дрожжевых культур. Для корректировки в кормовом продукте содержания эссенциальных компонентов в реакционную смесь добавляли 10 % боенской крови.

Контроль за количеством дрожжевой биомассы осуществляли спектрофотометрически по увеличению оптической плотности при 546 нм фильтрата через трехслойный марлевый фильтр.

Культивирование *Sacch. carlsbergensis* осуществляли при температуре 35 °С и умеренном периодическом перемешивании в течение 6 сут. Полученную массу кормовой добавки подвергали дальнейшему высушиванию с использованием распылительной сушилки и упаковывали в крафт-мешки.

Исследования физико-химических параметров исходного сырья и продукта проводили с использованием методик, принятых в биотехнологии и химии растительного сырья [21, 22].

Переваримость продукта оценивали прямым методом на поросятах по разнице масс исходного корма и естественных отходов.

Эксперименты проводили в трех повторностях. Статистическую обработку результатов осуществляли по стандартным методикам [23]. Полученные результаты не выходили за пределы доверительной вероятности $P = 0,95$.

Результаты и обсуждение

Исходное сырье — опад листвы березы и тополя содержал в своем составе, % от абсолютно

сухих веществ (% АСВ): целлюлозы — 32...42; лигнина — 18...22; гексозаны — 3...5; пентозаны — 18...25; уроновые кислоты — 5...8, зольность — 0,5...3,5, а также многие органические вещества, которые могут служить эффективными субстратами для роста микрофлоры. Так, листья березы, кроме большого количества целлюлозы и лигнина, содержат до 1 % масс. эфирных масел, кумаринов, сапонинов, фенолкарбоновых кислот, хлорофилла, каротиноидов, витаминов А, С, Е, флавоноидов, дубильных веществ, в микродозах имеются свободные amino- и жирные кислоты а также моносахара [24, 25].

Другой компонент перерабатываемой биомассы — отходы пивных дрожжей, не используют в пивоваренной промышленности по причине пониженной ростовой активности, однако они сохраняют способность к клеточному развитию на обогащенных природных субстратах.

Максимальный ростовой коэффициент при поверхностном твердофазном культивировании штамма *Sacch. carlsbergensis* 161 на данном субстрате наблюдался на 6-е сутки. Выход клеточной дрожжевой биомассы к этому сроку практически утраивался.

Для прогнозной оценки кормовой ценности исходного растительного субстрата и получаемого продукта был исследован компонентный состав субстрата до и после биодеструкции (табл. 1).

Из представленных в табл. 1 данных видно, что исходная смесь листового опада содержит достаточное количество составляющих компонентов, которые имеют потенциальную ценность для использования данного сырья в качестве субстрата при выращивании дрожжевых и других микроорганизмов.

В процессе культивирования наблюдалась убыль массы субстрата до 15...20 %, в то же время количество дрожжевой биомассы увеличивалось в 2–3 раза. Компонентный состав субстрата после биотехнической переработки содержит как низкомолекулярные, так и высокомолекулярные соединения (см. табл. 1). При культивировании можно фиксировать изменение биохимического состава растительного субстрата, при этом убыль массы исходного сырья происходит во многом за счет конверсии экстрактивных веществ и легкогидролизуемых полисахаридов. В процессе культивирования дрожжевой культуры происходило уменьшение количества практически всех компонентов субстрата. Так, общее содержание по антрону [22] полисахаридов в процессе культивирования снижалось более, чем на 18 %. При этом фиксировалась тенденция преимущественного биопотребления легкогидролизуемых растворимых сахаридов, их количество уменьшилось более чем на 25 %.

**Компонентный состав листового субстрата до биодеструкции
и ферментированного продукта, % на АСВ**

Component composition of leaf substrate before biodegradation and fermented product, % of absolutely dry matter

Наименование	Исходный смесевой (1:1) субстрат листьев березы и тополя	Ферментированный продукт
Вещества, экстрагируемые горячей ($t = 95\text{ }^{\circ}\text{C}$) водой	15	22
Вещества, экстрагируемые этанолом	3	5
Легкогидролизуемые водорастворимые сахараиды	12	8
Трудногидролизуемые полисахариды	15	18
Лигниновые вещества	18	16
Минеральные вещества	2	3

Т а б л и ц а 2

**Базовый элементный состав зольных
компонентов субстратов до и после
культивирования, мкг/кг АСВ**

**Basic elemental composition of ashy constituents
of substrates before and after cultivation,
 $\mu\text{g}/\text{kg}$ of absolutely dry matter**

Элемент	Листовой субстрат	Продукт после культивирования
Натрий	5100	5000
Калий	3500	3300
Кальций	1200	1100
Магний	5900	5750
Медь	7	6
Цинк	260	255
Железо	200	196
Свинец	0,3	0,3
Кадмий	0,5	0,4

Содержание лигниновых компонентов во всех случаях культивирования, в зависимости от соотношения листовых включений, уменьшилось на 10...16% по сравнению с исходным субстратом, поскольку в процессе биотрансформации листового сырья дрожжевыми культурами происходит преимущественная биодеструкция как углеводной составляющей сырья, так и лигниновых соединений. Общее содержание веществ лигноуглеводного комплекса в процессе биодеградациии снижалось в среднем в 1,5 раза.

Это подтверждает возможность биопереработки листового сырья дрожжевыми культурами, очевидно, за счет действия комплекса ферментов (целлюлаз и оксидоредуктаз), позволяющих дрожжевым культурам участвовать в биодеградациии веществ лигноуглеводного комплекса.

Содержание минеральных веществ в анализируемых объектах оставалось практически неизменным, поскольку в процессе биотрансформации происходит массоперенос веществ из растительной ткани в формируемую в процессе биосинтеза дрожжей клеточную микроструктуру.

Минеральные вещества не синтезируются в живых организмах, а их содержание обеспечивается исключительно при регулярном поступлении в организм с кормами и водой. Элементный состав зольных компонентов представлен в табл. 2.

Определенное внимание с точки зрения безопасности любого объекта, употребляемого в составе пищевой системы, уделяется наличию в нем тяжелых металлов. Суммарное содержание свинца и кадмия в получаемом продукте биодеструкции на листовом опаде не превышало допустимых уровней. Предельно допустимая концентрация (ПДК) свинца в пищевых продуктах составляет 0,1...1,0 мг/кг, кадмия — 0,2...1,0 мг/кг, в кормах — 0,5...5,0, т. е. по уровню содержания нормируемых тяжелых металлов исследуемые продукты укладываются в безопасный диапазон для потребления в составе кормов продуктивных животных [26].

Важное значение для оценки потенциального качества животных кормов имеет наличие в них микроэлементов, в частности железа, меди, кобальта, цинка, марганца, йода, бора и др. Медь, цинк и железо относятся к микробиоэлементам, они оказывают положительное влияние на устойчивость организма к заболеваниям и интенсивность накопления мышечной массы, что является важной целью сельскохозяйственного животноводства. В полученном продукте биотрансформации содержание железа и цинка составляло более 0,2 мг/кг. Добавление в перерабатываемую смесь боенской крови позволяло увеличить содержание железа, цинка и меди более чем в 1,5 раза.

Питательная ценность кормов преимущественно определяется содержанием в них белковых компонентов, необходимых для развития животной ткани и особей в целом. Белки состоят из аминокислот. Аминокислотный состав белковой пищи во многом определяет ее питательную и биологическую ценность. Сбалансированность продукта по аминокислотному составу является показателем, к которому следует стремиться при разработке питательных рационов (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Аминокислотный состав белка сырья и полупродуктов, г/100 г белка

Amino acid composition of protein raw materials and intermediates, g/100 g of protein

Аминокислоты	Листва березы	Листва тополя	Боенская кровь крупного рогатого скота	Дрожжи пивные	Кормовой продукт
Незаменимые, в том числе:	37,5	41,2	46,5	34,2	43,5
изолейцин (Иле)	3,1	3,3	3,5	3,6	3,4
лейцин (Лей)	6,4	5,4	12,0	10,1	7,1
лизин (Лиз)	4,5	6,7	4,1	6,2	5,9
метионин (Мет)	5,8	5,7	2,2	2,8	4,9
цистин (Цис)	1,6	2,5	1,6	0,1	2,4
фенилаланин (Фен)	3,3	4,2	4,7	4,1	3,6
тирозин (Тир)	2,8	2,4	4,6	3,2	2,8
треонин (Тре)	3,5	3,8	4,7	4,6	4,4
триптофан (Трп)	2,2	1,7	1,3	1,2	1,8
валин (Вал)	4,3	5,5	7,8	5,6	7,2
Заменимые, в том числе:	47,9	46,7	49,9	54,7	55,0
аланин (Ала)	4,7	4,4	8,9	6,9	8,2
аргинин (Арг)	5,9	4,3	5,5	6,4	5,7
аспарагин (Асп)	11,4	10,5	6,0	9,5	10,3
гистидин (Гис)	2,5	3,6	2,0	3,6	3,3
глицин (Гли)	3,3	3,4	5,3	4,5	5,0
глутамин (Глу)	10,4	11,4	10,2	14,5	12,3
пролин (Про)	5,2	5,5	4,7	3,9	5,0
серин (Сер)	4,5	3,6	7,3	5,4	5,2
Содержание белка, %	2,3	2,1	8,0	6,5	4,9

Биотрансформация листового опада приводит к росту содержания белка в конечном продукте вследствие развития клеток дрожжевой биомассы и трансформации лигноуглеводного макросо. Белки являются важнейшими компонентами всех живых систем, поэтому существует настоятельная необходимость в обеспечении их поступления в составе питательных рационов. В случае добавления в перерабатываемое сырье боенской крови, этот компонент также способствует увеличению массовой доли доступного белка в продукте, поскольку изначально содержит гемовые и легкоусвояемые альбумины.

Обычное содержание белка в растительной ткани составляет в стеблях 1,5...3 %, листе 1...3 %. Биотрансформация листы дрожжами позволяла увеличивать этот параметр до 5 % и более.

Представленный в табл. 3 аминокислотный состав белковой части кормового продукта показывает, что в ферментированном продукте содержится полный набор заменимых и незаменимых аминокислот, что важно для питательных рационов живых организмов. Аминокислотный анализ устанавливает содержание 18 аминокислот, при этом, глутамин и глутаминовая кислота фикси-

руются одним показателем — Глу, аналогично аспарагин и аспарагиновая кислота как Асп [22].

Биомасса клеток микроорганизмов обычно отличается высоким (15...22 %) содержанием белка, сбалансированного по аминокислотному составу, а также содержит углеводы, липиды, витамины, макро- и микроэлементы, которые являются эссенциальными компонентами для дальнейшего потребления в составе животного корма.

В табл. 4 представлен сравнительный анализ важнейших аминокислот в получаемом дрожжевом белке. Сопоставление данных по содержанию важнейших аминокислот с эталоном ФАО ВОЗ, установленного для пищевого белка пищевых систем млекопитающих (в том числе человека) показывает, что практически по всем незаменимым аминокислотам дрожжевая белковая составляющая ферментированного продукта соответствует категории высококачественной питательной системы.

Как отмечалось выше, в живой природе в составе любой биомассы присутствуют естественные белковые макрокомплексы, которые под воздействием внутренних ферментов подвергаются частичному гидролитическому распаду

Т а б л и ц а 4

Содержание незаменимых аминокислот в дрожжевом белке микробиологической части ферментированного продукта, г/100 г белка

The content of essential amino acids in the yeast protein of the microbiological part of the fermented product, g/100 g of protein

Аминокислота	Дрожжевой белок <i>Saccharomyces carlsbergensis</i>	Эталон ФАО
Лизин	6,3	5,5
Триптофан	1,3	1,0
Метионин	2,7	2,9
Треонин	4,6	4,0
Валин	5,5	5,0
Лейцин	10,2	7,0
Изолейцин	3,6	4,0
Фенилаланин	4,1	3,0

Т а б л и ц а 5

Основные показатели кормового продукта
Main indicators of the feed product

Показатель (массовая доля)	Ферментированный продукт на основе листового опада березы и тополя, %
Влага	8...15
Белок	5,0...5,5
Жир	10...15
Зола	3...5
Углеводы	55...60

с высвобождением свободных аминокислот, массовая доля которых обычно составляет 0,5...2 % масс. от общего содержания белка [20, 25, 27].

Анализ исходного смесового листового сырья показал, что содержание в нем свободных аминокислот составляло, мкг/г: Иле — 7, Лей — 8, Лиз — 5, Мет — 2, Цис — 3, Фен — 4, Тир — 2, Тре — 4, Трп — 2, Вал — 3, Ала — 33, Арг — 26, Асп — 32, Гис — 3, Гли — 26, Глу — 27, Про — 21, Сер — 43 (0,03 % от массы сырья).

После ферментативной обработки листового сырья дрожжевой культурой содержание большинства свободных аминокислот возрастало, что, по-видимому, связано не только с потреблением белка дрожжами, но и с активной работой трансформирующих ферментов. Так, в продукте зафиксированы свободные аминокислоты, мкг/г: Иле — 9, Лей — 9, Лиз — 5, Мет — 6, Цис — 5, Фен — 4, Тир — 4, Тре — 3, Трп — 4, Вал — 8, Ала — 41, Арг — 25, Асп — 38, Гис — 7, Гли — 31, Глу — 40, Про — 25, Сер — 48 (0,08 % от массы сырья). Наличие свободных аминокислот в составе потенциального корма увеличивает его питательную ценность.

В табл. 5 приведены усредненные значения основных физико-химических показателей биодеградированного продукта на основе листовой смеси березы и тополя. Варьирование параметров обусловлено разным составом исходного сырья.

Ферментированная масса листового сырья после сушки может использоваться как в качестве высокоусвояемой добавки для корма поросят, так и служить питательной основой кормов других сельскохозяйственных животных.

В настоящее время в России уделяется очень большое внимание использованию новых нетрадиционных видов сырьевых компонентов в составе кормовых добавок и комбикормов, что позволило бы повысить физиологический и экологический статус, продуктивность, сохранность и воспроизводство поголовья, а также осуществить замену импорта зарубежных кормов.

Проведенные испытания полученного продукта на животных (свиньях) показали, что степень усвояемости корма превышала 65 %.

По предварительным расчетам, использование разработанного кормового продукта даст возможность повысить продуктивность животных на 8...10 % и снизить затраты кормов на получение единицы продукции на 6...8 %.

Выводы

Разработана методология переработки бросового листового опада листовых растений с помощью отходов дрожжевой биомассы в целях получения кормовой основы сельскохозяйственных животных. Физико-химические и биологические показатели кормового продукта позволяют рассматривать его как возможную потенциальную замену импортируемым комбикормам.

Список литературы

- [1] Vostrikova N.L., Chernukha I.M., Mashentseva N.G., Kulikovskii A.V., Ivankin A.N. Achremko A.G Proteomics as a tool for studying meat autolysis // 63-rd International Congress of Meat Science and Technology 13–18 August, 2017, Cork, Ireland. pp. 870–873. DOI: 10.3921/978-90-8686-860-5
- [2] Baburina M.I., Vostrikova N.L., Kulikovskii A.V., Zarubina A.N., Ivankin A.N. Defragmenting processing of collagen-containing wastes of meat processing industry into functional feed additives for obtaining high-quality food // World J. of Food Science and Technology, 2017, v. 1, no. 2, pp. 39–46. DOI: 10.11648/j.wjfst.20170102.12
- [3] Бабурина М.И., Кузнецова Т.Г., Горбунова Н.А., Становова И.А., Иванкин А.Н. Влияние маннанолигосахаридов питательных рационов животных на качество мясной продукции // Теория и практика переработки мяса. Все о мясе, 2017. № 1. С. 33–36.
- [4] Giura L., Urtasun L., Ansorena D., Astiasarán I. Effect of freezing on the rheological characteristics of protein enriched vegetable puree containing different hydrocolloids for dysphagia diets // LWT, 2022, v. 169, no. 10, p. 114029. doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114029

- [5] Lyda K.R., Moldovan S.I., Choo K. Influence of mixing and diffusion on moisture content of maize in a feed mill wet bin // *Biosystems Engineering*, 2019, v. 178, no. 2, pp. 102–108. DOI: doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.11.007
- [6] Saha N., Goates C., Hernandez S., Jin W., Westover T., Klinger J. Characterization of particle size and moisture content effects on mechanical and feeding behavior of milled corn stover // *Powder Technology*, 2022, v. 405, no. 6, p. 117535. doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117535
- [7] Меншиков С.Л., Кузьмина Н.А., Мохначев П.Е. Аккумуляция металлов в хвое сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), в почве и снеговой воде в условиях техногенного загрязнения // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2020. Т. 24. № 3. С. 94–102. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-3-94-102
- [8] Корма, их классификация и питательная ценность. URL: <https://helpiks.org/8-101241.html> (дата обращения 03.03.2023).
- [9] Аминокислоты в кормах животных. URL: <http://belagrotorg.ru/stati/3009-aminokisloty-v-kormakh-zhivotnykh> (дата обращения 03.03.2023).
- [10] Кононов Г.Н., Веревкин А.Н., Сердюкова Ю.В., Жукова В.А. Древесина как химическое сырье. История и современность. IV. Делигнификация древесины как путь получения целлюлозы. Часть II // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2022. Т. 26. № 2. С. 69–84. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-2-69-84
- [11] Кононов Г.Н. Дендрохимия. Химия, нанохимия и биогеохимия компонентов клеток, тканей и органов древесных растений. В 2 т. М.: МГУЛ, 2015. 1111 с.
- [12] Hoyos-Carvajal O.S., Bissett J. 2009. Genetic and metabolic biodiversity of *Trichoderma* from Colombia and adjacent neotropical regions // *Fungal Genetics and Biology*, 2009, v. 46, no. 3, pp. 615–631.
- [13] Kasprzyk I. Forensic botany: who?, how?, where?, when? Review // *Science & Justice*, 2023, v. 63, no. 2, pp. 258–275. doi.org/10.1016/j.scijus.2023.01.002
- [14] Уланова Р.В., Гольштейн В.Г., Колпакова В.В. Изучение культивирования штамма *Pleurotus ostreatus* в глубокой культуре на среде зернового экстракта // *Достижения науки и техники АПК*, 2018. Т. 32. № 8. С. 82–87.
- [15] Pinedo-Rivilla C., Aleu J., Collado I.G. Pollutants biodegradation by *Fungi* // *Curr. Org. Chem.*, 2009, v. 13, no. 12, pp. 1194–1214. DOI: 10.2174/138527209788921774
- [16] Mshandete A.M., Mgonja J.R. Submerged liquid fermentation of some *Tanzanian Basidiomycetes* for the production of mycelial biomass, exopolysaccharides and mycelium protein using wastes peels media // *ARPN J. of Agricultural and Biological Science*, 2009, v. 4, no. 6, pp. 1–13.
- [17] Мамаева О.О., Исаева Е.В., Лоскутов С.Р., Плящечник М.А. Компонентный состав продукта биодеструкции опавших листьев базидиальными грибами *Pleurotus Pulmonarius* // *Химия растительного сырья*, 2021. № 1. С. 277–285. DOI: 10.14258/jcprpm.2021018851
- [18] Иванкин А.Н., Неклюдов А.Д., Прошина О.П. Особенности коллагена в мясном сырье // *Мясная индустрия*, 2009. № 1. С. 59–63.
- [19] Кузнецова Т.Г., Иванкин А.Н., Куликовский А.В. Наносенсорный анализ мясного сырья и растительных объектов. Саарбрюккен: LAMBERT Academic Publishing, 2012. 224 с.
- [20] Neklyudov A.D., Ivankin A.N., Berdutina A.V. Production and purification of protein hydrolysates (review) // *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2000, v. 36, no. 4, pp. 317–324.
- [21] Азаров В.И., Винославский В.А., Кононов Г.Н. Практикум по химии древесины и синтетических полимеров. М.: МГУЛ, 2006. 249 с.
- [22] Лисицын А.Б., Иванкин А.Н., Неклюдов А.Д. Методы практической биотехнологии. М.: Изд-во ВНИИМП, 2002. 408 с.
- [23] Лакин Г.Ф. Биометрия. М.: Высшая школа, 1990. 351 с.
- [24] Волова А.В., Наквасина Е.Н. Содержание макро- и микроэлементов в листьях березы (*Betula pendula* Roth) различных форм // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2019. Т. 23. № 6. С. 5–12. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-6-5-12
- [25] Jonczak J. The influence of birch trees (*Betula* spp.) on soil environment — A review // *Forest Ecology and Management*, 2020, v. 477, no.12, 118486. doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118486.
- [26] Нормы и требования №13-7-2/174. Ветеринарно-санитарные нормы и требования к качеству кормов для непродуктивных животных. М.: [б. и.], 1997. 100 с.
- [27] Иванкин А.Н. Химическая и биодegradация белковых компонентов растительного происхождения // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2023. Т. 27. № 1. С. 85–94. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-85-94

Сведения об авторах

Иванкин Андрей Николаевич — д-р хим. наук, академик Международной академии наук высшей школы (МАН ВШ), профессор кафедры химии и химических технологий лесного комплекса, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), aivankin@mgul.ac.ru

Веревкин Алексей Николаевич — канд. хим. наук, доцент кафедры химии и химических технологий лесного комплекса, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), verevkin@mgul.ac.ru

Поступила в редакцию 05.04.2023.

Одобрено после рецензирования 04.07.2023.

Принята к публикации 24.08.2023.

LEAF LITTER RECOVERY INTO FORAGE PRODUCTS WITH HIGH BIOLOGICAL VALUE

A.N. Ivankin✉, A.N. Verevkin

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

aivankin@mgul.ac.ru

The process of in vitro biotransformation of leaf litter in the presence of yeast cultures is described in order to obtain a feeding stuff product. A mixture of leaf litter of balsam poplar (*Populus balsamifera* L.) and silver birch (*Betula pendula*) was used as the initial raw material. The recovery of the mixture of vegetable raw materials was carried out in the presence of brewing waste — yeast cultures of *Saccharomyces carlsbergensis* of the 16th generation, which were added in an amount of 10...15 % to the mass of raw materials. The fermentation process by the solid-phase method was carried out with moderate stirring and heating for 6 days. To balance the final composition of the product, slaughtering blood was added to the initial mixture. The fermented product was dried and used as feed for cattle. It is shown that the process of biotechnical processing of leaf raw materials in the presence of yeast is accompanied by a moderate biotransformation of lignin substances with a decrease in their content in the final product, the transformation of carbohydrate components, and an increase in protein content. The amino acid composition of the protein part of the fermented product has been studied and it has been shown that it contains all the essential amino acids necessary for the full development of a living organism. It was also shown that in the product, in addition to the amino acids associated in the protein structure, the presence of an insignificant amount of free amino acids is recorded. The basic elemental composition of the ashy constituents of the substrates before and after cultivation was studied and it was noted that the amount of macro and micro bioelements corresponds to a safe level of their content in objects of natural origin. The main physical and chemical indicators of the product quality are established, which determine its efficiency for fodder purposes. Preliminary tests of the obtained product have been carried out and it has been shown that the mass of leaf raw materials fermented with yeast after drying can be used as a highly digestible additive for piglets' feedingstuff, and can also serve as a nutritional basis for obtaining bioeffective feed for growing farm animals.

Keywords: vegetable raw materials, leaf litter, brewer's yeast, biodegradation, hydrolysis, feed


Suggested citation: Ivankin A.N., Verevkin A.N. *Rekuperatsiya listovogo opada v kormovye produkty s vysokoy biologicheskoy tsennost'yu* [Leaf litter recovery into forage products with high biological value]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 6, pp. 75–83. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-75-83

References

- [1] Vostrikova N.L., Chernukha I.M., Mashentseva N.G., Kulikovskii A.V., Ivankin A.N. Achremko A.G Proteomics as a tool for studying meat autolysis. 63-rd International Congress of Meat Science and Technology 13–18 August, 2017, Cork, Ireland. pp. 870–873. DOI: 10.3921/978-90-8686-860-5
- [2] Baburina M.I., Vostrikova N.L., Kulikovskii A.V., Zarubina A.N., Ivankin A.N. Defragmenting processing of collagen-containing wastes of meat processing industry into functional feed additives for obtaining high-quality food. *World J. of Food Science and Technology*, 2017, v. 1, no. 2, pp. 39–46. DOI: 10.11648/j.wjfst.20170102.12
- [3] Baburina M.I., Kuznetsova T.G., Gorbunova N.A., Stanovova I.A., Ivankin A.N. *Vliyaniye mannanoligosakharidov pitatel'nykh ratsionov zhivotnykh na kachestvo myasnoy produktsii* [Influence of mannanoligosaccharides of animal diets on the quality of meat products]. *Teoriya i praktika pererabotki myasa. Vse o myase* [Theory and Practice of Meat Processing. All about meat], 2017, no. 1, pp. 33–36.
- [4] Giura L., Urtasun L., Ansorena D., Astiasarán I. Effect of freezing on the rheological characteristics of protein enriched vegetable puree containing different hydrocolloids for dysphagia diets. *LWT*, 2022, v. 169, no. 10, p. 114029. doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114029
- [5] Lyda K.R., Moldovan S.I., Choo K. Influence of mixing and diffusion on moisture content of maize in a feed mill wet bin. *Biosystems Engineering*, 2019, v. 178, no. 2, pp. 102–108. DOI: doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.11.007
- [6] Saha N., Goates C., Hernandez S., Jin W., Westover T., Klinger J. Characterization of particle size and moisture content effects on mechanical and feeding behavior of milled corn stover. *Powder Technology*, 2022, v. 405, no. 6, p. 117535. doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117535
- [7] Menshchikov S.L., Kuz'mina N.A., Mokhnachev P.E. *Akkumulatsiya metallov v khvoe sosny obyknovennoy (Pinus sylvestris L.), v pochve i snegovoy vode v usloviyakh tekhnogennogo zagryazneniya* [Accumulation of metals in Scotch pine needles (*Pinus sylvestris* L.), in soil and snow water under conditions of technogenic pollution] // *Forestry Bulletin*, 2020, v. 24, no. 3, pp. 94–102. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-3-94-102
- [8] *Korma, ikh klassifikatsiya i pitatel'naya tsennost'* [Feed, their classification and nutritional value]. Available at: <https://helpiks.org/8-101241.html> (accessed 03.03.2023).
- [9] *Aminokisloty v kormakh zhivotnykh* [Amino acids in animal feed]. Available at: <http://belagrotorg.ru/stati/3009-aminokisloty-v-kormakh-zhivotnykh> (accessed 03.03.2023).
- [10] Kononov G.N., Verevkin A.N., Serdyukova Ju.V., Zhukova V.A. *Drevesina kak khimicheskoe syr'e. Istoriya i sovremennost'. IV. Delignifikatsiya drevesiny kak put' polucheniya tsellyulozy. Chast' II* [Wood as chemical raw material. History and modernity. IV. Wood delignification as a way to produce cellulose. Part II]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 2, pp. 69–84. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-2-69-84

- [11] Kononov G.N. *Kononov G.N. Dendrokimiya. Khimiya, nanokhimiya i biogeokhimiya komponentov kletok, tkaney i organov drevesnykh rasteniy* [Dendrochemistry — chemistry, nanochemistry and biogeochemistry of the components of cells, tissues and organs of woody plants]. In 2 vol. Moscow: MGUL, 2016, 1111 p.
- [12] Hoyos-Carvajal O.S., Bissett J. 2009. Genetic and metabolic biodiversity of *Trichoderma* from Colombia and adjacent neotropical regions. *Fungal Genetics and Biology*, 2009, v. 46, no. 3, pp. 615–631.
- [13] Kasprzyk I. Forensic botany: who?, how?, where?, when? Review. *Science & Justice*, 2023, v. 63, no. 2, pp. 258–275. doi.org/10.1016/j.scijus.2023.01.002
- [14] Ulanova R.V., Gol'shteyn V.G., Kolpakova V.V. *Izuchenie kul'tivirovaniya shtamma Pleurotus ostreatus v glubinnoy kul'ture na srede zernovogo ekstrakta* [Study of the cultivation of the strain *Pleurotus ostreatus* in deep culture on the medium of grain extract]. *Dostizhenie nauki i tekhniki APK* [Achievement of science and technology of the APK], 2018, v. 32, no. 8, pp. 82–87.
- [15] Pinedo-Rivilla C., Aleu J., Collado I.G. Pollutants biodegradation by *Fungi*. *Curr. Org. Chem.*, 2009, v. 13, no. 12, pp. 1194–1214. DOI: 10.2174/138527209788921774
- [16] Mshandete A.M., Mgonja J.R. Submerged liquid fermentation of some *Tanzanian Basidiomycetes* for the production of mycelial biomass, exopolysaccharides and mycelium protein using wastes peels media. *ARNP J. of Agricultural and Biological Science*, 2009, v. 4, no. 6, pp. 1–13.
- [17] Mamaeva O.O., Isaeva E.V., Loskutov S.R., Plyashechnik M.A. *Komponentnyy sostav produkta biodestruktsii opavshikh list'ev bazidial'nymi gribami Pleurotus Pulmonarius* [Component composition of the product of biodestruction of fallen leaves by *Pleurotus Pulmonarius* basidial fungi]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of vegetable raw materials], 2021, no. 1, pp. 277–285. DOI: 10.14258/jcprm.2021018851
- [18] Ivankin A.N., Neklyudov A.D., Proshina O.P. *Osobennosti kollagena v myasnom syr'e* [Features of collagen in meat raw materials]. *Myasnaya industriya* [Meat industry], 2009, no. 1, pp. 59–63.
- [19] Kuznetsova T.G., Ivankin A.N., Kulikovskiy A.V. *Nanosensornyy analiz myasnogo syr'ya i rastitel'nykh ob'ektov* [Nanosensor analysis of meat raw materials and plant objects]. Saarbrücken: LAP LAMBERT, 2012, 224 p.
- [20] Neklyudov A.D., Ivankin A.N., Berdutina A.V. Production and purification of protein hydrolysates (review). *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2000, v. 36, no. 4, pp. 317–324.
- [21] Azarov V.I., Vinoslavskiy V.A., Kononov G.N. *Praktikum po khimii drevesiny i sinteticheskikh polimerov* [Workshop on the chemistry of wood and synthetic polymers]. Moscow: MSFU, 2006, 249 p.
- [22] Lisitsyn A.B., Ivankin A.N., Neklyudov A.D. *Metody prakticheskoy biotekhnologii* [Methods of practical biotechnology]. Moscow: VNIIMP, 2002. 408 p.
- [23] Lakin G.F. *Biometriya* [Biometrics]. Moscow: Higher School, 1990, 351 p.
- [24] Volova A.V., Nakvasina E.N. *Soderzhanie makro- i mikroelementov v list'yakh berezy (Betula pendula Roth) razlichnykh form* [The content of macro- and microelements in birch leaves (*Betula pendula* Roth) of various forms] // *Forestry Bulletin*, 2019, v. 23, no. 6, pp. 5–12. DOI: 10.1S698/2542-1468-2019-6-5-12
- [25] Jonczak J. The influence of birch trees (*Betula* spp.) on soil environment — A review. *Forest Ecology and Management*, 2020, v. 477, no.12, 118486. doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118486.
- [26] *Normy i trebovaniya №13-7-2/174. Veterinarno-sanitarnyye normy i trebovaniya k kachestvu kormov dlya neproduktivnykh zhivotnykh* [Norms and requirements No. 13-7-2/174. Veterinary and sanitary norms and requirements for the quality of feed for unproductive animals]. Moscow, 1997, 100 p.
- [27] Ivankin A.N. *Khimicheskaya i biodegradatsiya belkovykh komponentov rastitel'nogo proiskhozhdeniya* [Chemical and biological degradation of phytogenic protein components]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 1, pp. 85–94. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-85-94

Authors' information

Ivankin Andrey Nikolaevich  — Dr. Sci. (Chem.), Academician of the International Higher Education Academy of Sciences (IHEAS), Professor of the Department of Chemistry, BMSTU (Mytishchi branch), aivankin@mgul.ac.ru

Verevkin Aleksey Nikolaevich — Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, Department of Chemistry and Chemical Technologies of the Forest Complex, BMSTU (Mytishchi branch), verevkin@mgul.ac.ru

Received 05.04.2023.

Approved after review 04.07.2023.

Accepted for publication 24.08.2023.

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

ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА ПОСЛЕЭКСТРАКЦИОННОГО ОСТАТКА ХВОИ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ (*PINUS SYLVESTRIS* L.)

Л.К. Казарян^{1, 2✉}, С.Р. Лоскутов¹, О.А. Шапченкова¹,
М.А. Пляшечник¹, Г.В. Пермякова¹, Ю.С. Шимова²

¹ФГБУН «Институт леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук» — обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Россия, 660036, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 28

²ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», Россия, 660049, г. Красноярск, пр. Мира, д. 82

kazaryan.lk@ksc.krasn.ru

Экстракционной переработкой хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) получают продукты, используемые для производства товаров в сельскохозяйственной, медицинской, пищевой, парфюмерно-косметической и других отраслях. При этом послеэкстракционный остаток хвои, являясь специфическим лигноцеллюлозным сырьем, пока не находит должного (эффективного) использования для получения инновационных продуктов. С помощью методов термогравиметрии (ТГ/ДТГ) и дифференциальной сканирующей калориметрии установлены показатели термического разложения (окисления) биоугля, образующегося в результате пиролиза послеэкстракционного остатка хвои. На основе результатов термического анализа по уравнениям Бройдо и Колмогорова — Ерофеева — Авраами рассчитаны кинетические параметры: кажущаяся энергия активации и константа скорости термоокислительной деструкции угля на разных стадиях. Установлены температурные диапазоны стадий и тепловые эффекты окислительной термодеструкции. По методу Криадо определен механизм термического разложения (окисления) биоугля. На основе четвертой производной контура ДТГ выявлена детальная «фракционность» убыли массы при нагреве биоугля в условиях термогравиметрического теста. Приведены ИК-спектральные параметры биоугля. Зарегистрировано 46 пиков на пирограмме в результате аналитического флэш-пиролиза послеэкстракционного остатка хвои. Идентифицировано 29 компонентов пиролизата с вероятностью соответствия масс-спектральной базе данных NIST $\geq 90\%$. Среди них выявлены соединения, которые могут применяться в органическом синтезе, производстве технических и пищевых продуктов, парфюмерии, при создании медицинских товаров и т. п. Определены особенности строения частиц биоугля и элементный состав минеральных включений. Полученные результаты рекомендуется применять при проектировании объектов производства технических продуктов с повышенной добавленной стоимостью и масштабировании технологий пиролиза отходов экстракционной переработки хвои (древесной зелени) и подобного растительного сырья.

Ключевые слова: хвоя, послеэкстракционный остаток, продукты пиролиза, биоуголь, физико-химические характеристики

Ссылка для цитирования: Казарян Л.К., Лоскутов С.Р., Шапченкова О.А., Пляшечник М.А., Пермякова Г.В., Шимова Ю.С. Характеристика продуктов пиролиза послеэкстракционного остатка хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 6. С. 84–97.

DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-84-97

Актуальность комплексного использования лесных ресурсов обусловлена быстрым уменьшением лесных площадей в результате индустриальной эксплуатации лесов. Особенно большие потери потенциального сырья (до 80...100 %) образуются после рубок ухода [1]. Повышение эффективности использования всей биомассы дерева и утилизация древесных отходов, образующихся в процессе заготовки и переработки древесины, по-прежнему являются важными задачами для лесной отрасли [3, 4].

Ценным сырьем для получения продуктов с высокой добавленной стоимостью служит древесная зелень, к которой, по ГОСТ [2], относятся хвоя, листья, почки и неодревесневшие побеги. Для заготовки древесной зелени используют све-

жесрубленные деревья и кустарники на рубках главного и промежуточного пользования, а также растущие деревья в соответствии с требованиями основ лесного законодательства.

По данным З.Я. Нагимова и др. [5], надземная фитомасса сосновых древостоев в пересчете на сухой вес составляет от 1,64 до 3,20 т/га. Запасы хвои в лишайниково-зеленомошных сосняках варьируют от 1,0 до 5,4 т/га [6]. Приведенные данные свидетельствуют о крупнотоннажности запасов хвои как сырья для массовой переработки в целях получения различной продукции.

Во второй половине XX в. были разработаны способы и технологии экстракционной переработки древесной зелени некоторых видов хвойных для производства востребованных товаров, которые обобщены в монографиях [7, 8]. Вместе с тем сведения о физико-химических свойствах

послеэкстракционного остатка древесной зелени, в частности хвои, и его рационального использования весьма фрагментарны и не могут служить основой для создания новых технологий.

Для региона Сибири, где преобладает заготовка древесины сосны, хвоя как круглогодичный ресурс является значимым лесохимическим сырьем и довольно широко используется для получения из нее путем экстракционной переработки следующих продуктов: эфирного масла; хвойной муки; бальзамов и иной косметической продукции (в частности скрабов, лосьонов) [9].

По литературным данным, в 2010–2020 гг. получили развитие исследования, направленные на создание технологий утилизации хвои в целях производства таких продуктов, как биотопливо, биосорбенты, индивидуальные компоненты пиролиза, биологически чистые композиционные материалы и различные продукты биотехнологической переработки [10–16].

Цель работы

Цель работы — определение параметров процесса термоокислительной деструкции биоугля, получаемого в результате пиролиза твердого остатка хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) после извлечения из нее водорастворимых веществ, и компонентного состава продуктов пиролиза послеэкстракционного остатка хвои, ИК-спектральных и электронно-микроскопических показателей структуры биоугля.

Материалы и методы

Хвоя сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) различного возраста была заготовлена из чистого соснового насаждения, расположенного на северо-западе зеленой зоны г. Красноярск, не подвергшегося техногенному и негативному биотическому воздействию.

Подготовку среднего образца и экстракцию горячей водой осуществляли по методикам, изложенным в работах В.И. Ягодина [7] и А.В. Оболенской и соавт. [17]. Выход водорастворимых веществ хвои сосны при экстрагировании горячей водой составил $24,68 \pm 1,01$ %. Биоуголь (biochar) был получен в результате шести параллельных экспериментов пиролиза образцов послеэкстракционного остатка хвои в атмосфере азота при нагреве до 700 °С с использованием аналитической системы TG 209 F1. Выход биоугля при этих условиях составил $22,35 \pm 0,42$ %.

Сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) полученного биоугля осуществляли с помощью микроскопа TM-1000 («HITACHI», Япония) с рентгеноспектральным анализатором SwiftED-TM EDX («Oxford Instruments Analytical Ltd.», Великобритания).

Термические характеристики биоугля определяли методами термогравиметрии (ТГ) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) (ТГ/ДТГ — TG 209 F1, ДСК — ДСК 204 F1 «NETZSCH», Германия) в окислительной среде (воздух). Компонентный состав продуктов флэш-пиролиза послеэкстракционного остатка хвои (в атмосфере гелия) определяли с помощью аналитической системы EGA/PY-3030D/GCMS-QP2020 (Пи-ГХ/МС, «Shimadzu», Япония). ИК-спектры биоугля записаны с помощью инфракрасного спектрометра Vertex-80V («Bruker», Германия). Методические детали измерений описаны ранее [18–20].

Кинетические параметры и механизм реакции термоокислительной деструкции биоугля определяли методами Бройдо [21], Криадо [22] и Колмогорова — Ерофеева — Авраами [23].

Результаты и обсуждение

Сканирующая электронная микроскопия является достаточно информативным методом для изучения строения материалов. Размер частиц биоугля варьирует в пределах $0,8 \dots 1,2$ мкм. На изображениях частиц биоугля, полученных с большим увеличением ($\times 300$, $\times 400$), четко различимы характерные анатомические элементы хвои (рис. 1). Покровные ткани хвои при пиролизе частично разрушаются. Через их разрывы хорошо видна трансформированная складчатая паренхима (см. рис. 1, 1). Архитектура проводящего пучка остается практически неизменной (см. рис. 1, 2). Очертания устьиц изменились по сравнению с нативной хвоей (см. рис. 1, 3).

Изображение, полученное с помощью СЭМ, показывает пористую структуру частиц биоугля. Морфология поверхности образцов биомассы существенно изменяется после пиролиза [24]. На частицах биоугля появляются трещины и отверстия, образованные в результате выделения летучих веществ в процессе пиролиза. При этом, как правило, чем выше степень конверсии биомассы при пиролизе, тем больше пористость и ниже плотность получаемого углеродного материала, используемого в производстве активированного угля (многоцелевого сорбента), нанотрубок и других инновационных материалов.

Использование СЭМ в сочетании с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией показало, что в результате пиролиза послеэкстракционного остатка хвои в разных местах частиц биоугля возникают скопления минеральных агрегатов (см. рис. 1, 4). Всего в составе обнаружено 12 элементов (Al, Fe, K, Ca, Si, Mg, Na, S, Ti, P, Cl, Cr) в различных комбинациях. Результаты наших измерений согласуются с работой В.В. Тараканова и др., в которой представлены результаты изучения элементного состава хвои сосны [25].

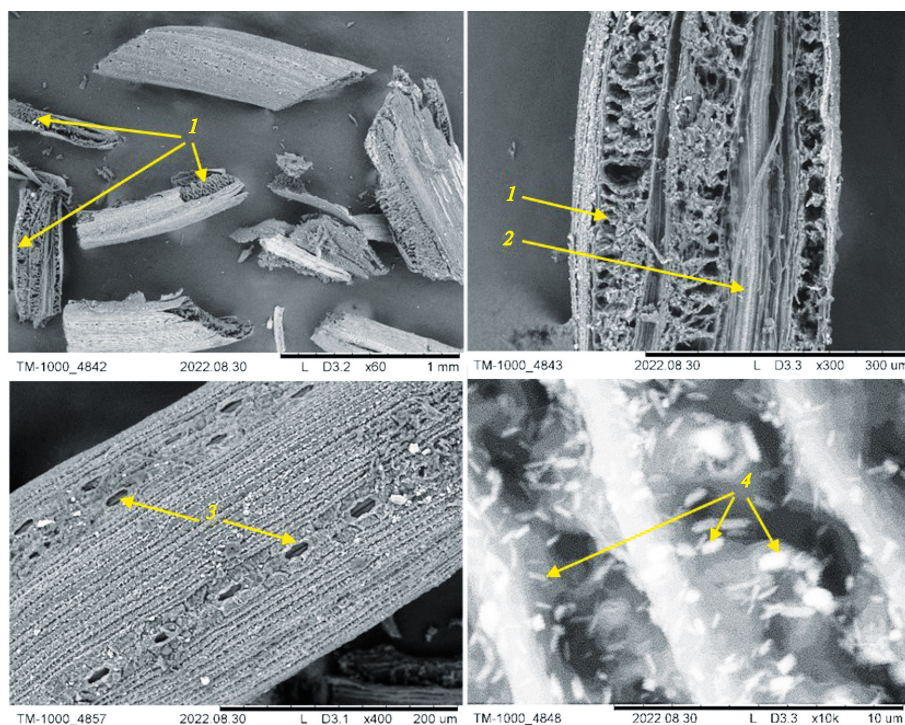


Рис. 1. Изображение частиц биоугля, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа: 1 — складчатая паренхима; 2 — проводящий пучок; 3 — устьица; 4 — скопление агрегатов минеральных частиц

Fig. 1. Scanning electron microscope images of biochar particles: 1 — folded parenchyma; 2 — conducting bunch; 3 — stomata; 4 — aggregates of mineral particles

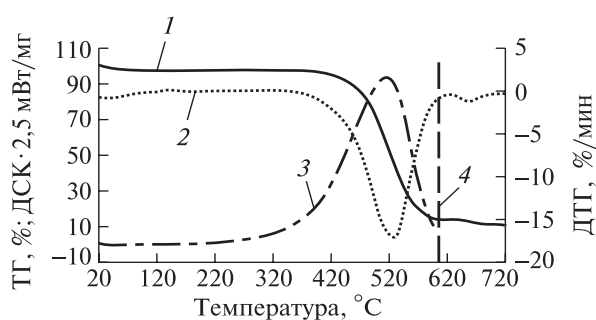


Рис. 2. Потеря массы (ТГ, 1), скорость потери массы (ДТГ, 2) и тепловой поток (ДСК, 3) биоугля при скорости нагрева 20 °С/мин в окислительной среде (на воздухе); 4 — максимальная рабочая температура сканирующего калориметра DSC 204 F1

Fig. 2. Curves of mass loss (1), mass loss rate (2) and heat flow (3) of biochar at the heating rate of 20 °C/min in an oxidizing atmosphere (air). The vertical dashed line (4) marks the maximum operating temperature of the scanning calorimeter DSC 204 F1

Термический анализ позволяет определить важные характеристики углей разного происхождения. Для определения некоторых параметров, включая кинетические, а также термоокислительной деструкции биоугля нами использованы методы ТГ и ДСК.

На рис. 2 представлены термограммы ТГ/ДТГ и ДСК термоокислительной деструкции биоугля,

а в табл. 1–3 параметры процесса термического разложения. Из этих данных следует, что убыль массы биоугля протекает в четыре стадии. На первой стадии, в температурном диапазоне от 29 до 114 °С, происходит удаление влаги — 2,68 %. На второй стадии (при температуре от 357 до 624 °С) наблюдается наибольшая потеря массы — 83,8 %. На двух заключительных стадиях (при температуре от 624 до 684 °С и от 684 до 800 °С соответственно) происходит окислительная деструкция термостабильных доменов структуры биоугля. В процессе термоокислительной деструкции пики ДТГ, отвечающие соответствующей потере массы, имеют различную температуру и амплитуду (см. рис. 2, табл. 2). При нагреве биоугля в окислительной среде со скоростью 20 °С/мин в ДСК-измерениях были зафиксированы слабовыраженная эндотерма испарения влаги и один экзотермический максимум (см. рис. 2, табл. 3).

Нами определены четвертые производные контуров ДТГ и ДСК биоугля, по которым визуализируется детальный профиль потери массы и тепловых эффектов при нагреве биоугля (рис. 3). Четвертые производные контуров ДТГ и ДСК как функции температуры были рассчитаны с использованием метода сплайн-интерполяции Савицкого — Голея (последовательно по четырем точкам свертки экспериментальных зависимостей

Т а б л и ц а 1

Убыль массы биоугля при скорости нагрева 20 °С/мин
The mass loss of biochar at the heating rate of 20 °С/min

Стадия	Температура, °С	Потеря массы, %
Первая	29...114	2,68
Вторая	357...624	83,80
Третья	624...684	2,28
Четвертая	684...800	1,12

Т а б л и ц а 2

Скорость убыли массы биоугля при скорости нагрева 20 °С/мин
The mass loss rate of biochar at the heating rate of 20 °С/min

Стадия	ДТГ _{max} %/мин	t _{max} , °С
Первая	-0,83	44
Вторая	-17,18	527
Третья	-1,20	657
Четвертая	-0,45	682

Т а б л и ц а 3

Параметры ДСК-кривой биоугля при со скорости нагрева 10 °С/мин
Parameters of the DSC-curve of biochar at the heating of 10 °С/min

Стадия	Температурный интервал, °С	t _{min} (эндо), °С	Q _{эндо} , Дж/г	t _{max} (экзо), °С	Q _{экзо} , кДж/г
Первая	23...76	48	-72,05	—	—
Вторая	260...590	—	—	514	23,63

для генерации производных) в программной среде «TableCurve 2D, V. 5.01».

Из рис. 3 следует, что контуры ДТГ и ДСК отражают суперпозицию «микростадий» термической деструкции биоугля по скорости термодеструкции (потери массы) и тепловыделению, сопровождающему этот процесс.

Кажущаяся энергия активации в процессе термоокислительной деструкции биоугля изменяется (рис. 4, табл. 4). Расчет зависимости проведен с использованием метода сплайн-интерполяции Савицкого — Голея последовательно по четырем точкам свертки экспериментальной зависимости убыли массы (ТГ, %) от температуры (t, °С) в координатах уравнения Бройдо, применяемыми для определения энергии активации E_a, затем генерации E_a = γ(α) в программной среде «TableCurve 2D, V. 5.01».

Для полного понимания процесса пиролиза очень важно знать механизм реакции. В данном исследовании он идентифицирован с помощью метода Криадо и др. [22], по которому функция (1),

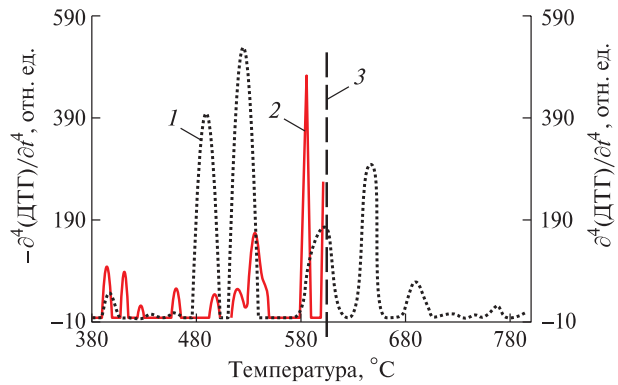


Рис. 3. Зависимости $-\partial^4(\text{ДТГ})/\partial t^4$ (1) и $\partial^4(\text{ДСК})/\partial t^4$ (2) от температуры для биоугля; максимальная рабочая температура сканирующего калориметра DSC 204 F1 (3)
 Fig. 3. The dependences $-\partial^4(\text{ДТГ})/\partial t^4$ (1) and $\partial^4(\text{ДСК})/\partial t^4$ (2) on the temperature for biochar; the maximum operating temperature of the scanning calorimeter DSC 204 F1 (3)

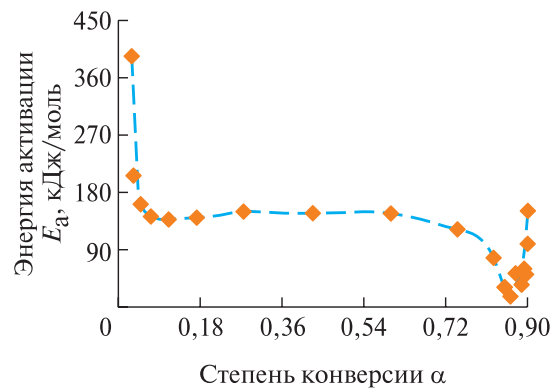


Рис. 4. Зависимость энергии активации (E_a) от степени конверсии (α) для термодеструкции биоугля
 Fig. 4. The dependence of activation energy (E_a) on the degree of conversion (α) for thermal degradation of biochar

Т а б л и ц а 4

Константы скорости термоокислительной деструкции биоугля, рассчитанные по ТГ-кривым с использованием уравнения Колмогорова — Ерофеева — Авраами
The rate constants of thermal oxidative degradation of biochar calculated from TG curves using the Kolmogorov — Yerofeyev — Avraami equation

Стадия	Температура, °С	Константа скорости, K, с ⁻¹	Коэффициент детерминации R ²
Первая	372...432	1,335·10 ⁻³	0,989
Вторая	462...580	7,923·10 ⁻³	0,998
Третья	612...862	4,217·10 ⁻³	0,982

Примечание. Уравнение Колмогорова — Ерофеева — Авраами: $\ln[-\ln(1 - \alpha)] = \ln k + n \ln \tau$. Константа скорости термоокислительной деструкции биоугля рассчитана по формуле Саковича: $K = n \times k^{(1/n)}$, α — степень конверсии, τ — время, n и k — параметры.

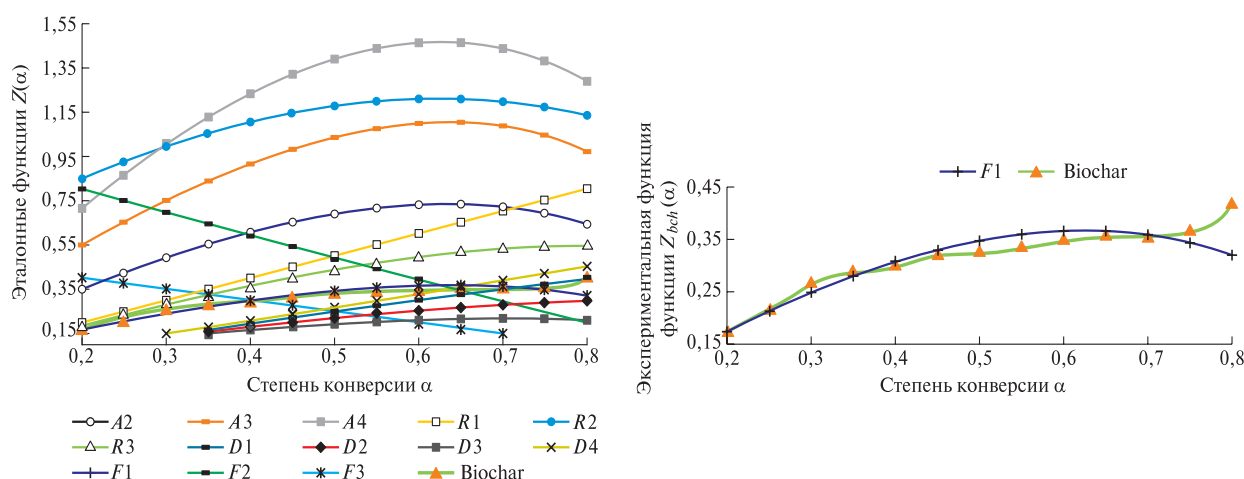


Рис. 5. Сравнение экспериментальной кривой (bch) с эталонными кривыми $Z(\alpha)$ ($A2 \dots F3$) по методу Криадо [22], отвечающим механизмам реакции: $A2, A3, A4$ — нуклеация и рост по Колмогорову — Ерофееву — Авраами; $R1$ — реакция, контролируемая границей раздела фаз, одномерное движение; $R2$ — реакция, контролируемая границей раздела фаз, сжимающаяся (стягивающаяся) поверхность; $R3$ — реакция, контролируемая границей раздела фаз, сжимающийся (стягивающийся) объем; $D1$ — одномерная диффузия; $D2$ — двумерная диффузия (уравнение Валенси); $D3$ — трехмерная диффузия (уравнение Джандера); $D4$ — трехмерная диффузия (уравнение Гинстлинга — Броунштейна); $F1$ — первый порядок, случайное зарождение одного ядра на отдельной частице; $F2$ — второй порядок, случайное зарождение двух ядер на отдельной частице; $F3$ — третий порядок, случайное зарождение с тремя ядрами на отдельной частице

Fig. 5. Comparison of the experimental curve (bch) with the reference curves $Z(\alpha)$ ($A2 \dots F3$) according to the Criado method [22], corresponding to the reaction mechanisms: $A2, A3, A4$ — nucleation and growth according to Kolmogorov — Erofeev — Avraami; $R1$ — interface-controlled reaction, one-dimensional motion; $R2$ — interface-controlled reaction, shrinking (shrinking) surface; $R3$ — interface-controlled reaction, shrinking (shrinking) volume; $D1$ — one-dimensional diffusion; $D2$ — two-dimensional diffusion (Valensi equation); $D3$ — three-dimensional diffusion (Jander equation); $D4$ — three-dimensional diffusion (Ginstling-Brownstein equation); $F1$ — first order, random nucleation of one nucleus on a single particle; $F2$ — second order, random nucleation of two nuclei on a single particle; $F3$ — third order, random nucleation with three nuclei on a single particle

построенная для исследуемого биоугля на основе экспериментальной зависимости $E_a = \gamma(\alpha)$ (см. рис. 4), сравнивается с эталонными зависимостями $Z(\alpha) = f(\alpha)g(\alpha)$ для различных механизмов реакции: $f(\alpha)$ — математическая модель реакции, которая описывает зависимость скорости реакции от степени конверсии; $g(\alpha)$ — интегральная кинетическая функция или интегральная модель реакции (2) [26] (рис. 5):

$$Z_{bch}(\alpha) = \left[\frac{d\alpha}{dt} \frac{E_a}{R} e^{\frac{E_a}{RT}} P(x) \right], \quad (1)$$

где $x = \frac{E_a}{RT}$, $P(x)$ — четвертое рациональное

выражение, предложенное в работе [27],

$$g(\alpha) = \int_0^{\alpha} \frac{d\alpha}{f(\alpha)}. \quad (2)$$

Из рис. 5 следует, что $Z_{bch}(\alpha)$ при $\sim 0,15 < \alpha < 0,75$ наиболее близка по виду к $Z(\alpha)$, отвечающей механизму реакции $F1$: разложение начинается с образования случайных точек (ядер) на биоугле, которые становятся центром для термоокислительной деструкции.

С помощью инфракрасной Фурье-спектроскопии проанализировано наличие основных функциональных групп (C–H, C=C, C–O), обычно наблюдаемых в структуре биоуглей.

Инфракрасный Фурье-спектр биоугля характеризуется довольно широкими перекрывающимися полосами поглощения, образующими как результат наблюдаемый контур. Используя вторые производные инфракрасных Фурье-спектров можно увидеть «внутреннее содержание контура» (рис. 6) [28, 29].

Спектры a – $в$ (см. рис. 6) были рассчитаны с использованием метода сплайн-интерполяции Савицкого — Голея (последовательно по четырем точкам свертки экспериментальных спектров для генерации производных) в программной среде «TableCurve 2D, V. 5.01».

Диапазон волновых чисел от 700 до 2400 см^{-1} («отпечатков пальцев») является наиболее характеристическим для оценки структурных показателей любых органических веществ, синтетических полимеров, лигноцеллюлозных материалов и т. п. В данном случае в нем наблюдаются две полосы — при 1602 и 1397 см^{-1} , отвечающие скелетным колебаниям ароматических колец и кар-

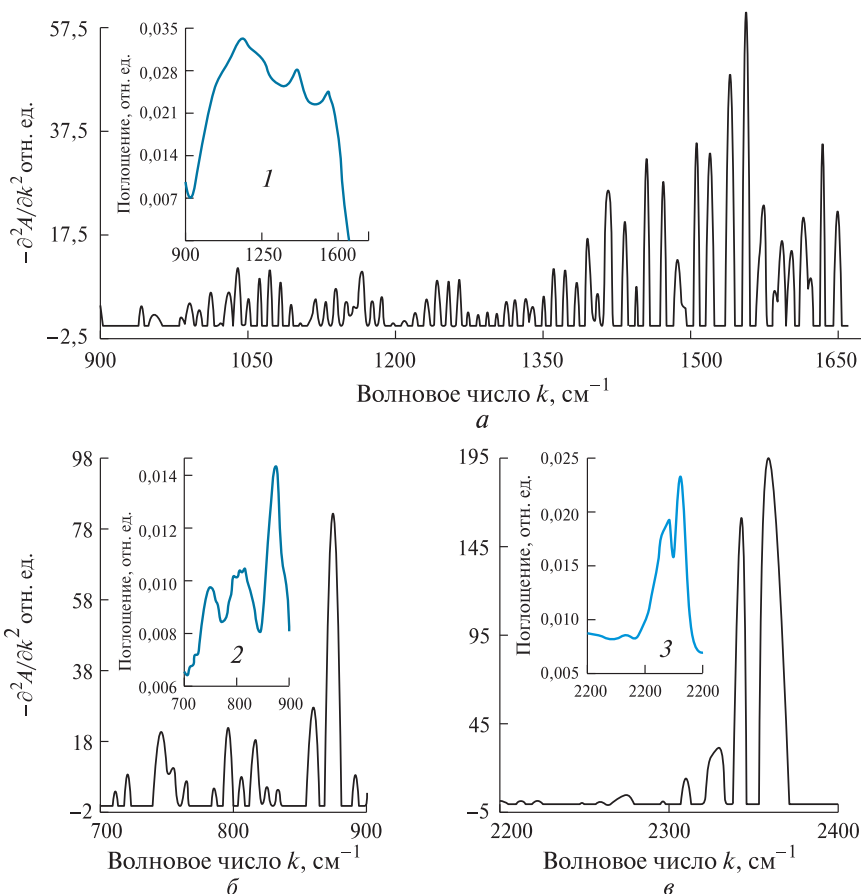


Рис. 6. Вторые производные (а–в) характеристических поддиапазонов инфракрасных Фурье-спектров поглощения биоугля (1–3).

Fig. 6. The second derivatives (a–в) of the characteristic sub-ranges of Infrared Fourier absorption spectra of biochar (1–3)

бонильных групп соответственно, образованных, по-видимому, в результате реакций перегруппировки и циклизации органического вещества при высокой температуре [30]. Полосы в области от 700 до 1100 см^{-1} относятся преимущественно к минеральным соединениям [31]. В частности, силикаты обладают интенсивным поглощением в области 1000...1100 см^{-1} (по вторым производным выделяется восемь полос поглощения: 1012, 1029, 1039, 1051, 1061, 1073, 1082, 1094 см^{-1} , см. рис. 6, а, б). Из второй производной спектров (см. рис. 6, а–в) также можно получить дополнительную информацию о функциональных группах. В частности, полосы при 1361 и 1573 см^{-1} могут соответствовать графитовой структуре. Обычно связи С–С в графитовых кольцах не являются ИК-активными, однако замена С на N в ароматических связях нарушает симметрию структуры колец, способствуя образованию диполей и делая эти полосы ИК-активными [32]. Пики в диапазоне 1244...1253 см^{-1} относятся к валентным колебаниям связей С–N и фенольных С–О, а полосу при 1695...1715 см^{-1} можно отнести к колебаниям связи С=О в кислотах, заземленных в микропорах угля.

Пик при полосе 1648 см^{-1} в образце биоугля может быть отнесен к валентным колебаниям связи С=О в ароматических кольцах. На второй производной спектра наблюдаются полосы 1588...1593 и 1382 см^{-1} , соответствующие скелетным колебаниям ароматического кольца структуры биоугля [33].

Оценка качества углей на базе метода инфракрасной Фурье-спектроскопии осуществляется по параметрам, определяемым как отношения интенсивности полос поглощения на характеристических частотах. К ним относятся: степень ароматичности углей ($I_{3040/2920}$); параметр, характеризующий долю деформационных колебаний связей С–Н в ароматических фрагментах ($I_{1600/1440}$); параметры, характеризующие количественные показатели алифатических и ароматических связей С–Н по отношению внутреннего стандарта полос поглощения скелетных колебаний ароматических колец при полосе 1600 см^{-1} ($I_{2920/1600}$ и $I_{3040/1600}$) [34] (рис. 7).

По основному показателю (степени ароматичности) биоуголь близок к древесному углю.

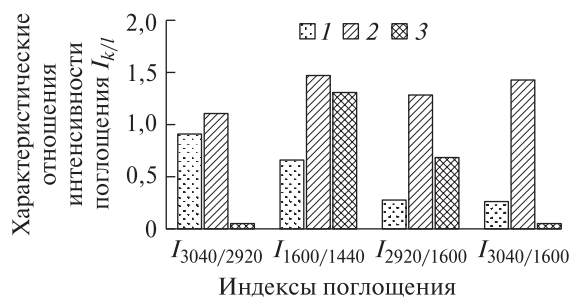


Рис. 7. Характеристические отношения интенсивности (индексы) поглощения в ИК-диапазоне для разных углей: 1 — биоуголь; 2 — древесный уголь; 3 — средние значения $I_{k/l}$ для смеси каменных углей, добываемых в Республике Тыва [34]

Fig. 7. The characteristic ratios of the absorbance intensity in the IR-range for various coals: 1 — biochar; 2 — charcoal; 3 — average values of $I_{k/l}$ for a mixture of coals mined in the Republic of Tuva [34]

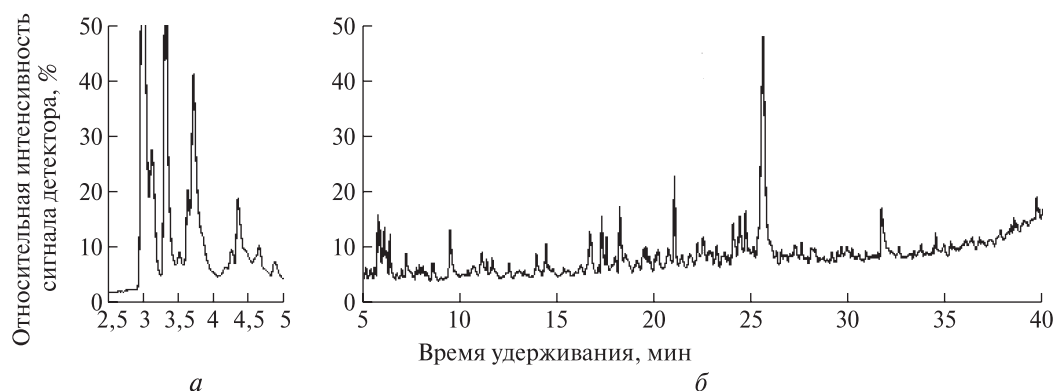


Рис. 8. Пирограмма послеэкстракционного остатка хвои: *a* — интервал времени удерживания с шагом 0,5 мин, *b* — 5 мин

Fig. 8. Pyrogram of post-extraction residue of pine needles: *a* is the retention time interval in increments of 0,5 minutes, *b* is 5 minutes

По другим параметрам все угли существенно отличаются.

Современные системы аналитического пиролиза являются мощным инструментом для характеристики биополимеров. Аналитический пиролиз используется в большинстве исследований объектов окружающей среды как метод качественного анализа, однако его можно быть использовать и для количественных измерений [35] (рис. 8, табл. 5).

В результате аналитического пиролиза (Пи) в сочетании с газовой хроматографией (ГХ) и масс-спектрометрией (МС) (Пи-ГХ/МС) послеэкстракционных остатков хвои идентифицировано 29 соединений, суммарная относительная площадь пиков которых составила 84,23%. Представленные продукты пиролиза являются производными полисахаридов, лигнина, протеинов, липидов и высокомолекулярных терпенов, характерных для хвои, содержание которых в разы превышает их массовую долю в коре и древесине сосны [5, 6, 36]. Полученные нами результаты согласуются с данными, представленными в литературе. Так, А. Трубецкая и др. [37] сообщали, что продукты пиролиза биомассы сосны обыкновенной, включающей в себя хвою, ветки, шишки, сердцевину древесины и кору, представлены кислотами, кетонами, фуранами, фенольными соединениями. Исследование хвои сосны обыкновенной и продуктов ее биоразложения (в подстилке)

с помощью аналитического пиролиза показало, что вклад органического вещества хвои в почву состоит в основном из гваяцил-лигнинных мономеров и полисахаридов, которыми обусловлен компонентный состав их пиролизата [38]. Следует отметить, что среди продуктов флэш-пиролиза послеэкстракционных остатков хвои есть соединения, которые не встречаются в составе пиролизатов коры [39] и древесины этой породы [40].

Для выделения отдельных групп соединений из пиролизной жидкости можно использовать схему (рис. 9), предложенную А.Р. Валеевой и А.И. Валиуллиной [41]. На первом этапе пиролизная жидкость (ПЖ-1) подвергается вакуумной разгонке для удаления уксусной кислоты и летучих терпеноидов. Далее полученный остаток (ПЖ-2) последовательно подвергается водной экстракции для выделения углеводных компонентов и органических растворителей для извлечения нейтральных веществ. Неэкстрагируемый остаток представляет собой фенольный комплекс (ФК).

Довольно высокое содержание 1,6-ангидро- β -D-глюкопиранозы (левоглюкозана) и метилглиоксала (17,2 и 9,2% соответственно) делает выгодным их выделение из пиролизата. Трудноразделяемые компоненты могут быть получены с помощью современной препаративной флэш-хроматографии. Целесообразность выделения ряда индивидуальных компонентов из пиролизной жидкости обусловлена их востребо-

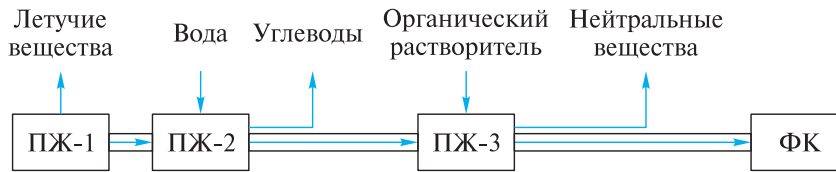


Рис. 9. Принципиальная схема фракционирования жидких продуктов пиролиза
Fig. 9. Scheme of liquid pyrolysis products fractionation

Т а б л и ц а 5

Продукты пиролиза послеэкстракционного остатка хвои

Pyrolysis products of pine needles post-extraction residue

Номер пика	Время удерживания, мин	Относительная площадь пика A, %	Компонент
1	2,986	16,58	Диоксид углерода
2	3,305	9,16	Метилглиоксаль
3	3,620	1,55	2-бутен-1,4-диол, (Z)-
4	3,701	4,25	Этанон, 1-оксиранил-
5	4,243	0,50	Бутанал, 3-гидрокси-
6	4,327	1,86	2-пропанон, 1-гидрокси-
7	4,629	0,52	Муравьиная кислота, гептиловый эфир
8	5,739	1,68	2-пропанон, 1-гидрокси-
9	5,833	0,97	1,3,5-циклогептатриен
10	5,990	0,40	Янтарный диальдегид
11	6,087	0,79	Бутаненилтрил, 2,3-диоксо-, диоксим, O,O'-диацетил
12	6,369	1,07	Октаналь
13	7,193	1,00	3-диметиламиноакрилонитрил
14	7,886	0,15	2,5-циклооктадиен-1-ол, ацетат
15	8,533	0,50	3-децин-2-ол
16	9,472	1,62	Азиридин, 2-(1,1-диметилметил)-метил,-транс
17	11,358	0,47	1-децен
18	13,908	0,86	Фенол, 3-метил-(м-крезол)
19	14,407	1,13	Фенол, 2-метокси- (о-гваякол)
20	17,283	2,12	Гептаналь
21	17,527	1,20	2-метокси-4-метилфенол (креозол)
22	18,209	3,69	Бензофуран, 2,3 - дигидро-
23	21,033	2,92	2-метокси-4-винилфенол (4-винилгваякол)
24	23,210	1,13	Октадекановая кислота, 2-оксо -, метил
25	24,049	2,88	3-(децилокси)-2-(триметилсилил)окси-пропан-1-амин
26	24,382	2,38	3,4-альтросан (3,4-ангидрогексопираноза)
27	24,702	1,66	Фенол, 2-метокси-4-(1-пропенил)-
28	25,598	17,15	1,6-ангидро-β-D-глюкопираноза (левоглюкозан)
29	31,700	4,04	(E)-4-(3-гидроксипроп-ен-1-ил)-

Примечание. Относительная площадь пика прямо пропорциональна массовой доле компонента. Вероятность соответствия с базой данных «NIST» ≥ 90 %.

ванностью и сравнительно высокой добавленной стоимостью. Так, 1,6-ангидро-β-D-глюкопираноза используется в синтезе хиральных полимеров, производстве флуоресцентных пигментов для рекламных и печатных красок. Стоимость 25 г 1,6-ангидро-β-D-глюкопиранозы составляет 3989 руб. [42]. Метилглиоксаль впервые был обнаружен в меде мануки, где он является мощным антибактериальным веществом. Чем выше концентрация метилглиоксаля, тем сильнее антибактериальные качества. Благодаря антибактериальным свойствам метилглиоксаля мед мануки

полезен для дыхательной и иммунной систем при борьбе с простудой, гриппом и более опасными заболеваниями [43].

1,3-циклопентадиен используется для получения инсектицидов (альдрин, изодрин и др.), металлоценов, циклопентана, циклопентена, гексахлорциклопентадиена, соединений норборненового ряда и др. [44]. 2-бутен-1,4-диол, (Z) находит применение для получения некоторых важных средств защиты растений, фармацевтических средств и промежуточных продуктов [45].

Октаналь применяется для синтеза альфа-гексилкоричного альдегида, является компонентом пищевых эссенций, используется, как и гептаналь, в производстве парфюмерных композиций [44]. Стоимость 5 мл октанала составляет 130 руб., 100 мл гептанала — 344 руб. [42].

Эпоксидциклопропаны, являющиеся этерифицированными продуктами циклопропилкарбинолов, обладают ценными технологическими и эксплуатационными свойствами, что позволяет использовать их при изготовлении полимерных материалов, клеев и герметиков, покрытий [46]. Стоимость 250 мл циклопропилкарбинола составляет 25 357 руб. [42].

2-метокси-4-винилфенол находит свое применение в качестве ароматизатора. Это один из компонентов, отвечающих за естественный аромат гречки [47]. Стоимость 5 г 2-метокси-4-винилфенола составляет 5824 руб. [42].

Бензофуран, 2,3-дигидро- и другие производные бензофурана используют как отбеливатели в бумажной промышленности, как сцинтилляционные материалы, антиоксиданты в получении каучуков, в качестве лекарственных препаратов [44].

Характеризуя продукты флэш-пиролиза послеэкстракционных остатков хвои по сравнению с составом пиролизатов древесины и коры сосны обыкновенной, следует отметить наличие около 30 уникальных компонентов с повышенной добавленной стоимостью, имеющих промышленное значение.

При сравнении компонентного состава пиролизатов послеэкстракционных остатков хвои (*Pinus silvestris* L.) с составом пиролизата хвои сосны, произрастающей в Индии [48] (авторы не указывают вид дерева), оказывается, что более 50 % компонентов не встречается в составе пиролизата хвои, приведенном в цитируемой работе. Это обстоятельство указывает на возможность использования метода Пи-ГХ/МС в хемотаксономии.

Выводы

Исследование свойств основных продуктов пиролиза послеэкстракционного остатка хвои сосны обыкновенной — биоугля и пиролизата показали, что выход биоугля при нагреве послеэкстракционных остатков хвои до 700 °С со скоростью 10 °С/мин, с учетом минерального остатка, составил $22,35 \pm 0,42$ %. Сгорание биоугля происходит в температурном диапазоне 357...800 °С. Экзотермический тепловой эффект этого процесса при ДСК-измерении составил 23,63 МДж/кг, что близко к значению удельной теплоты сгорания древесного угля. Механизм реакции термического разложения биоугля при изменении степени конверсии α от ~0,15 до 0,75 отвечает реакции слу-

чайной нуклеации и последующим развитием термоокислительной деструкции. Компонентный состав продуктов пиролиза послеэкстракционного остатка хвои свидетельствует об уникальности и высокой добавленной стоимости некоторых индивидуальных соединений, которые могут быть выделены ректификацией или препаративной флэш-хроматографией пиролизной жидкости.

Полученные новые данные могут найти применение при разработке способов (режимов) тепловой обработки растительных материалов, аналогичных хвое (послеэкстракционным остаткам); создании технологии пиролиза хвои (древесной зелени хвойных видов) как возобновляемого круглогодично доступного растительного сырья с целью получения востребованных химических соединений, а также биоугля как биотоплива и/или сорбента.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 0287-2021-0011, Рег. НИОКТР № 121031500335-2. В исследовании использовалось оборудование Красноярского регионального центра коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН.

Список литературы

- [1] Медников Ф.А. Комплексное использование древесной зелени для получения лечебных препаратов и кормовых продуктов // ИзВУЗ Лесной журнал, 1976. № 3. С. 116–118.
- [2] ГОСТ 21769–84. Государственный стандарт. Зеленая древесная. Технические условия. Введ. 23.03.84. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1984. 7 с.
- [3] Бондарев В.Я., Гусева Л.М. Особенности подготовки сырья для пиролиза древесины // Вестник Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии, 2014. Т. 4. С. 106–110.
- [4] Ерохина О.А., Пекарец А.А., Сандмирова А.Г., Кузнецов А.Г., Аким Э.Л. Изучение упруго-релаксационных свойств пластифицированной древесины лиственницы и сосны // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: материалы VI Междунар. науч.-техн. конф., посвященной памяти профессора В.И. Комарова, Архангельск, 09–11 сентября 2021 г. Архангельск: Изд-во Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова, 2021. С. 92–98.
- [5] Нагимов З.Я., Артемьева И.Н., Шевелина И.В., Нагимов В.З. Видовой состав и запасы фитомассы живого напочвенного покрова в сосняках лишайниковых ХМАО – Югры // Леса России и хозяйство в них, 2022. № 1 (80). С. 48–56.
- [6] Загидуллина А.Т. Пространственная структура, динамика и продуктивность лишайниково-зеленомошных сосняков (Карельский лесной район): дис. ... канд. биол. наук: 1.5.15. Санкт-Петербург, 2021. 171 с.
- [7] Ягодин В.И. Основы химии и технологии переработки древесной зелени / под ред. Ю.И. Холькина. Л.: Изд-во ЛГУ, 1981. 224 с.
- [8] Левин Э.Д., Репях С.М. Переработка древесной зелени. М.: Лесная пром-сть, 1984. 120 с.
- [9] Сибирский хвойный доктор. URL: <https://pk-ecovit.ru/katalog/> (дата обращения: 20.06.2022).

- [10] Kumain A., Bhattacharya T.K., Sharma H.K. Physico-chemical and Thermal Characteristics of Pine Needle Biochar Briquetted Fuel using Soil, Lime and Cement as a Binder // *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.*, 2020, v. 9, no. 10, pp. 3675–3690.
- [11] Медведев С.О., Терентьев И.И. Анализ технологий производств топливных гранул на основе древесного сырья // *Научный журнал КубГАУ*, 2019. № 149. С. 1–8.
- [12] Крысанова К.О., Крылова А.Ю., Пудова Я.Д., Борисов А.В. Исследование минеральных компонентов биоуглей из опила, полученных низкотемпературными методами // *Уголь*, 2021. № 12. С. 41–43.
- [13] Саввов С.И., Маркова Е.Б., Фоминых Ю.Г., Чередниченко А.Г. Исследование процесса пиролиза образцов хвойных пород древесины // *Успехи в химии и химической технологии*, 2018. № 8. С. 8–11.
- [14] Мамышов А.А. Методы получения активированного угля из растительного сырья // *Бюл. науки и практики*, 2020. № 12. С. 268–273.
- [15] Слюсарский К.В., Ларионов К.Б., Ивашкина Е.Н., Заворин А.С., Губин В.Е. Технологические решения по утилизации жидких продуктов медленного пиролиза древесной биомассы // *Изв. Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 2021. № 12. С. 173–188.
- [16] Pandey D., Daverey A., Dutta K., Yata V.K. Valorization of waste pine needle biomass into biosorbents for the removal of methylene blue dye from water: Kinetics, equilibrium and thermo-dynamics study // *Environmental Technology & Innovation*, 2022, v. 25, pp. 8–12.
- [17] Оболенская А.В., Ельницкая З.П., Леонович А.А. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы. М.: Экология, 1991. 320 с.
- [18] Лоскутов С.Р., Шапченко О.А., Анискина А.А. Термический анализ древесины основных лесообразующих пород Средней Сибири // *Сибирский лесной журнал*, 2015. № 6. С. 17–30.
- [19] Кондрашева Н.К., Еремеева А.М. Получение биодизельного топлива из растительного сырья // *Записки Горного института*, 2023. Т. 260. С. 248–256.
- [20] Petrunina E.A., Loskutov S.R., Ryazanova T.V., Aniskina A.A., Permyakova G.V., Stasova V.V. Comparative analysis of physico-chemical properties of larch and pine bark: thermal analysis and analytical pyrolysis // *Siberian Forest J.*, 2022, no. 4, pp. 35–49.
- [21] Broido A. A simple, sensitive graphical method of treating thermogravimetric analysis data // *J. Polym. Sci.*, 1969, part A-2, v. 7, pp. 1761–1773.
- [22] Criado J., Malek J., Ortega A. Applicability of the master plots in kinetic analysis of nonisothermal data // *Thermochim Acta*, 1989, v. 147, pp. 377–385.
- [23] Ярусова С.Б., Макаренко Н.В., Гордиенко П.С., Карпенко М.А., Новикова Е.С. Влияние температуры на кинетику сорбции ионов Co^{2+} и Ni^{2+} сорбентом на основе производного инозитгексафосфорной кислоты // *Журнал физической химии*, 2018. Т. 92. № 3. С. 451–456.
- [24] Ray A. Characterization of Biochars from Various Agricultural ByProducts Using FTIR Spectroscopy, SEM focused with image Processing // *International J. of Agriculture, Environment and Biotechnology*, 2020, v. 13(4), pp. 423–430.
- [25] Тараканов В.В., Милютин Л.И., Куценогий К.П., Ковальская Г.А., Игнатьев Л.А., Самсонова А.Е. Элементный состав хвои в разных клонах сосны обыкновенной // *Лесоведение*, 2007. № 1. С. 28–35.
- [26] Sharma P., Diwan P.K. Study of thermal decomposition process and the reaction mechanism of the eucalyptus wood // *Wood Sci Technol.*, 2017, v. 51, pp. 1081–1094.
- [27] Pérez-Maqueda L.A., Criado J.M. The accuracy of Senum and Yang's approximations to the Arrhenius integral // *J. Therm Anal Calorim*, 2000, v. 60, pp. 909–915.
- [28] Baldassarre M., Li C., Eremina N., Goormaghtigh E. Simultaneous Fitting of Absorption Spectra and Their Second Derivatives for an Improved Analysis of Protein Infrared Spectra // *Molecules*, 2015, v. 20, pp. 12599–12622.
- [29] Лоскутов С.Р., Тютькова Е.А., Пляшечник М.А., Петрунина Е.А., Шапченко О.А., Анискина А.А. Ранняя инструментальная диагностика грибных инфекций в древесине // *Сибирский лесной журнал*, 2021. № 6. С. 39–45.
- [30] Fuente E., Menéndez J.A., Díez Díaz-Estébanez M.A., Suárez D. Infrared Spectroscopy of Carbon Materials: A Quantum Chemical Study of Model Compounds // *J. Phys. Chem.*, 2003, v. 107, pp. 6350–6359.
- [31] Тарасевич Б.Н. Основы ИК-спектроскопии с преобразованием Фурье. Подготовка проб в ИК-спектроскопии. М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 2012. 22 с.
- [32] Rodil S.E., Ferrari A.C., Robertson J., Muhl S. Infrared spectra of carbon nitride films // *Thin Solid Films*, 2002, no. 420–421, pp. 122–131.
- [33] Bornemann L. Rapid assessment of black carbon in soil organic matter using mid-infrared spectroscopy // *Organic Geochemistry*, 2008, v. 39(11), pp. 1537–1544.
- [34] Монгуш Г.Р. Исследование изменения технических показателей и химических свойств (методом ИК-спектрального анализа) угольных смесей тувинских месторождений // *Международ. журн. прикладных и фундаментальных исследований. Химические науки*, 2019. № 12. С. 157–162.
- [35] Parsi Z., Hartog N., Górecki T., Poerschmann J. Analytical pyrolysis as a tool for the characterization of natural organic matter – A comparison of different approaches // *J Anal Appl Pyrolysis*, 2007, v. 79, iss. 1–2, pp. 9–15.
- [36] Fengel D., Grosse D. Chemische Zusammensetzung von Nadel- und Laubhölzern // *Holz Roh Werkst*, 1975, v. 33, no. 1, pp. 32–34.
- [37] Trubetskaya A., Attard T.M., Budarin V., Hunt A. Supercritical extraction of biomass – a green and sustainable method to control the pyrolysis product distribution // *ACS Sustainable Chemistry & Engineering is a Transformative Journal*, 2021, v. 9, pp. 5278–5287.
- [38] Dijkstra E.F., Boon J.J., van Mourik J.M. Analytical pyrolysis of a soil profile under Scots pine // *European J. of Soil Science*, 1998, v. 49, pp. 295–304.
- [39] Петрунина Е.А., Рязанова Т.В., Анискина А.А., Пермякова Г.В., Стасова В.В. Сравнительный анализ физико-химических свойств коры лиственницы и сосны: термический анализ и аналитический пиролиз // *Сибирский лесной журнал*, 2022. № 4. С. 35–49.
- [40] Лоскутов С.Р., Шапченко О.А., Петрунина Е.А., Пляшечник М.А., Тютькова Е.А., Пашенова Н.В., Гродницкая И.Д., Анискина А.А., Сенашова В.А. Диагностика ранних изменений физико-химических свойств древесины под действием грибных инфекций // *Химия растительного сырья*, 2022. № 2. С. 61–72.
- [41] Валеева А.Р., Валиуллина А.И., Бикбулатова Г.М., Башкиров В.Н. Уменьшение массовой доли свободного формальдегида в фенолоформальдегидных смолах с замещением фенола жидкими продуктами пиролиза древесины // *Деревообрабатывающая промышленность*, 2021. № 3. С. 94–102.
- [42] Реарус. Материалы для лаборатории. URL: <https://rearus.ru/> (дата обращения 24.06.2022).
- [43] Лазу. URL: <https://lazu-newzealand.com/med-manuka> (дата обращения 29.06.2022).
- [44] Химия во всех проявлениях — химический портал. URL: <https://chemport.ru/> (дата обращения 29.06.2022).
- [45] Пат. 2154527 Российская Федерация. Способ получения бутен-2-диола-1,4 / Маттиас Ирганг, 20.08.00. 2021. 8 с.
- [46] Гулиев А.М. Модификация эпоксициановой смолы эпоксиалкени-циклопропанами // *Журнал прикладной химии*, 1978. № 2. С. 417–420.
- [47] Wikiето.ru. URL: <https://wikiето.ru/wiki/a-2-Methoxy-4-vinylphenol> (дата обращения 30.06.2022).
- [48] Varma A.K., Mondal P. Pyrolysis of sugarcane bagasse in semi batch reactor: Effects of process parameters on product yields and characterization of products // *Industrial Crops and Products*, 2017, v. 95, pp. 704–717.

Сведения об авторах

Казарян Лилит Кареновна [✉] — инженер, ФГБУН «Институт леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук» — обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, kazaryan.lk@ksc.krasn.ru

Лоскутов Сергей Реджинальдович — д-р. хим. наук, академик IAWS, зав. лабораторией физ.-хим. биологии древесных растений, ФГБУН «Институт леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук» — обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, lsr@ksc.krasn.ru

Шапченкова Ольга Александровна — канд. биол. наук, ст. науч. сотр., ФГБУН «Институт леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук» — обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, sholga@ksc.krasn.ru

Пляшечник Мария Анатольевна — науч. сотр., ФГБУН «Институт леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук» — обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, lilwood@ksc.krasn.ru

Шимова Юлия Сергеевна — канд. хим. наук, доцент кафедры химической технологии древесины и биотехнологии, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», shimovays@mail.sibsau.ru

Пермякова Галина Васильевна — науч. сотр., ФГБУН «Институт леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук» — обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, permyakova.gv.@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 28.12.2022.

Одобрено после рецензирования 18.04.2023.

Принята к публикации 27.09.2023.

PYROLYSIS PRODUCTS CHARACTERISTICS OF PINE NEEDLES (*PINUS SYLVESTRIS* L.) POST-EXTRACTION RESIDUE

L.K. Kazaryan^{1, 2✉}, S.R. Loskutov¹, O.A. Shapchenkova¹,
M.A. Plyashechnik¹, Yu.S. Shimova², G.V. Permyakova¹

¹Sukachev Institute of Forest SB RAS, Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center» SB RAS, 50, build. 28, Akademgorodok, 660036, Krasnoyarsk, Russia

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 82 Mira Ave., Krasnoyarsk, Russia

kazarya.lk@ksc.krasn.ru

Extraction processing of pine needles (*Pinus sylvestris* L.) gives products used for the manufacturing goods for agriculture, medicine, food, perfumery and cosmetics and other industries. At the same time, the post-extraction residue of pine needles, being a specific lignocellulose raw material, has not yet found wide application for obtaining innovative products. Thermogravimetry (TG/DTG) and differential scanning calorimetry (DSC) methods were used to establish parameters of thermal oxidative degradation of biochar obtained by pyrolysis of the post-extraction residue of pine needles. Considering the results of thermal analysis, we used the Broido and Kolmogorov — Yerofeyev — Avraami equations to calculate kinetic parameters: the apparent activation energy and the rate constant of oxidative degradation of biochar at different stages. The temperature ranges of the stages, the thermal effects of thermal oxidative degradation, as well as the IR spectral parameters for biochar were established. By the method of the fourth derivative of the DTG contour, a detailed «fractionality» of the biochar mass loss was established. A pyrogram of post-extraction residue of pine needles showed 46 peaks, among which them 29 compounds were identified with a 90 % probability of matching the NIST mass spectral database. Many of the identified compounds can be used in organic synthesis, in the production of technical and food products, perfumes, medical products, etc. Using a scanning electron microscope with an X-ray spectral analyzer (TM-1000-Swift-TM EDX), the structural features of biochar particles were observed; the mineral inclusions consisted of Al, Fe, K, Ca, Si, Mg, Na, S, Ti, P, Cl, Cr. The results obtained can be used to design the production of technical products with increased added value and to scale up the pyrolysis technology of waste extraction processing of pine needles and, possibly, similar plant raw materials.

Keywords: needles, post-extraction residue, pyrolysis products, bio-coal, physico-chemical characteristics

Suggested citation: Kazaryan L.K., Loskutov S.R., Shapchenkova O.A., Plyashechnik M.A., Permyakova G.V., Shimova Yu.S. *Kharakteristika produktov piroliza posleekstraktsionnogo ostatka khvoi sosny obyknovennoy (Pinus sylvestris L.)* [Pyrolysis products characteristics of pine needles (*Pinus sylvestris* L.) post-extraction residue]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 6, pp. 84–97. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-84-97

References


- [1] Mednikov F.A. *Kompleksnoe ispol'zovanie drevesnoy zeleni dlya polucheniya lechebnykh preparatov i kormovykh produktov* [Complex use of woody greens for the production of medicinal preparations and feed products]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 1976, no. 3, pp. 116–118.
- [2] GOST 21769–84 *Gosudarstvennyy standart. Zelen' drevesnaya. Tekhnicheskie usloviya* [State standard. Woody greens. Technical conditions]. Enter. 23.03.84. Moscow: USSR State Committee for Standards, 1984, 7 p.
- [3] Bondarev V.Ya., Guseva L.M. *Osobennosti podgotovki syr'ya dlya piroliza drevesiny* [Features of the preparation of raw materials for wood pyrolysis]. *Vestnik Nizhegorodskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* [Bulletin of the Nizhny Novgorod State Agricultural Academy], 2014, t. 4, pp. 106–110.
- [4] Erokhina O.A., Pekarets A.A., Sandimirova A.G., Kuznetsov A.G., Akim E.L. *Izuchenie uprugorelaksatsionnykh svoystv plastifitsirovannoy drevesiny listvennitsy i sosny* [Study of elastic-relaxation properties of plasticized larch and pine wood]. *Problemy mekhaniki tsellyulozno-bumazhnykh materialov: mater. VI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy pamyati professora V.I. Komarova* [Problems of mechanics of pulp and paper materials: material. VI International Scientific and Technical Conference dedicated to the memory of Professor V.I. Komarova], Arkhangelsk, September 09–11, 2021. Arkhangelsk: Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 2021, pp. 92–98.
- [5] Nagimov Z.Ya., Artem'eva I.N., Shevelina I.V., Nagimov V.Z. *Vidovoy sostav i zapasy fitomassy zhiivogo napochvennogo pokrova v sosnyakh lishaynikovyykh KhMAO – Yugry* [Species composition and phytomass reserves of living ground cover in lichen pine forests of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra]. *Lesa Rossii i khozyaystvo v nikh* [Forests of Russia and management in them], 2022, no. 1 (80), pp. 48–56.
- [6] Zagidullina A.T. *Prostranstvennaya struktura, dinamika i produktivnost' lishaynikovo-zelenomoshnykh sosnyakov (Karel'skiy lesnoy rayon)* [Spatial structure, dynamics and productivity of lichen-green moss pine forests (Karelian forest region)]. *Dis. Cand. Sci. (Biol.): 1.5.15*. St. Petersburg, 2021, 171 p.
- [7] Yagodin V.I. *Osnovy khimii i tekhnologii pererabotki drevesnoy zeleni* [Fundamentals of chemistry and technology for processing woody greens]. Ed. Yu.I. Kholkina. Leningrad: Leningrad State University Publishing House, 1981, 224 p.
- [8] Levin E.D., Repyakh S.M. *Pererabotka drevesnoy zeleni* [Processing of woody greens]. Moscow: Lesnaya prom-st' [Forest industry], 1984, 120 p.
- [9] *Sibirskiy khvoynyy doktor* [Siberian coniferous doctor]. Available at: <https://pk-ecovit.ru/katalog/> (accessed 20.06.2022).
- [10] Kumain A., Bhattacharya T.K., Sharma H.K. Physico-chemical and Thermal Characteristics of Pine Needle Biochar Briquetted Fuel using Soil, Lime and Cement as a Binder. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.*, 2020, v. 9, no. 10, pp. 3675–3690.
- [11] Medvedev S.O., Terent'ev I.I. *Analiz tekhnologiy proizvodstv toplivnykh granuly na osnove drevesnogo syr'ya* [Analysis of technologies for the production of fuel pellets based on wood raw materials]. *Nauchnyy zhurnal KubSAU* [Scientific J. of KubSAU], 2019, no. 149, pp. 1–8.
- [12] Krysanova K.O., Krylova A.Yu., Pudova Ya.D., Borisov A.V. *Issledovanie mineral'nykh komponentov biougley iz opila, poluchennykh nizkitemperaturnymi metodami* [Study of the mineral components of biochars from sawdust obtained by low-temperature methods]. *Ugol' [Coal]*, 2021, no. 12, pp. 41–43.
- [13] Savvov S.I., Markova E.B., Fominykh Yu.G., Cherednichenko A.G. *Issledovanie protsessa piroliza obraztsov khvoynykh porod drevesiny* [Study of the pyrolysis process of softwood samples]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Advances in chemistry and chemical technology], 2018, no. 8, pp. 8–11.
- [14] Mamyshev A.A. *Metody polucheniya aktivirovannogo uglya iz rastitel'nogo syr'ya* [Methods for producing activated carbon from plant raw materials]. *Byulleten' nauki i praktiki* [Bulletin of Science and Practice], 2020, no. 12, pp. 268–273.
- [15] Slyusarskiy K.V., Larionov K.B., Ivashkina E.N., Zavorin A.S., Gubin V.E. *Tekhnologicheskie resheniya po utilizatsii zhidkikh produktov medlennogo piroliza drevesnoy biomassy* [Technological solutions for the disposal of liquid products slow pyrolysis of woody biomass]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [News of Tomsk Polytechnic University. Georesource Engineering], 2021, no. 12, pp. 173–188.
- [16] Pandey D., Daverey A., Dutta K., Yata V.K. Valorization of waste pine needle biomass into biosorbents for the removal of methylene blue dye from water: Kinetics, equilibrium and thermo-dynamics study. *Environmental Technology & Innovation*, 2022, v. 25, pp. 8–12.
- [17] Obolenskaya A.V., El'nitskaya Z.P., Leonovich A.A. *Laboratornye raboty po khimii drevesiny i tsellyulozy* [Laboratory work on the chemistry of wood and cellulose]. Moscow: Ecology, 1991, 320 p.
- [18] Loskutov S.R., Shapchenkova O.A., Aniskina A.A. *Termicheskii analiz drevesiny osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod Sredney Sibiri* [Thermal analysis of wood of the main forest-forming species of Central Siberia]. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* [Siberian Forest Journal], 2015, no. 6, pp. 17–30.
- [19] Kondrasheva N.K., Ereemeeva A.M. *Poluchenie biodizel'nogo topliva iz rastitel'nogo syr'ya* [Production of biodiesel fuel from plant raw materials]. *Zapiski Gornogo instituta* [Notes of the Mining Institute], 2023, t. 260, pp. 248–256.
- [20] Petrunina E.A., Loskutov S.R., Ryazanova T.V., Aniskina A.A., Permyakova G.V., Stasova V.V. Comparative analysis of physico-chemical properties of larch and pine bark: thermal analysis and analytical pyrolysis. *Siberian Forest J.*, 2022, no. 4, pp. 35–49.
- [21] Broido A. A simple, sensitive graphical method of treating thermogravimetric analysis data. *J. Polym. Sci.*, 1969, part A-2, v. 7, pp. 1761–1773.
- [22] Criado J., Malek J., Ortega A. Applicability of the master plots in kinetic analysis of nonisothermal data. *Thermochim Acta*, 1989, v. 147, pp. 377–385.
- [23] Yarusova S.B., Makarenko N.V., Gordienko P.S., Karpenko M.A., Novikova E.S. *Vliyanie temperatury na kinetiku sorbtсии ionov Co^{2+} i Ni^{2+} sorbentom na osnove proizvodnogo inozitgeksafosfornoj kisloty* [The influence of temperature on the kinetics of sorption of Co^{2+} and Ni^{2+} ions by a sorbent based on a derivative of inositol hexaphosphoric acid]. *Zhurnal fizicheskoy khimii* [J. of Physical Chemistry], 2018, v. 92, no. 3, pp. 451–456.
- [24] Ray A. Characterization of Biochars from Various Agricultural ByProducts Using FTIR Spectroscopy, SEM focused with image Processing. *International J. of Agriculture, Environment and Biotechnology*, 2020, v. 13(4), pp. 423–430.

- [25] Tarakanov V.V., Milyutin L.I., Kutsenogiy K.P., Koval'skaya G.A., Ignat'ev L.A., Samsonova A.E. *Elementnyy sostav khvoi v raznykh klonakh sosny obyknovnoy* [Elemental composition of needles in different clones of Scots pine]. *Lesovedenie*, 2007, no. 1, pp. 28–35.
- [26] Sharma P., Diwan P.K. Study of thermal decomposition process and the reaction mechanism of the eucalyptus wood. *Wood Sci Technol.*, 2017, v. 51, pp. 1081–1094.
- [27] Pérez-Maqueda L.A., Criado J.M. The accuracy of Senum and Yang's approximations to the Arrhenius integral. *J. Therm Anal Calorim.*, 2000, v. 60, pp. 909–915.
- [28] Baldassarre M., Li C., Eremina N., Goormaghtigh E. Simultaneous Fitting of Absorption Spectra and Their Second Derivatives for an Improved Analysis of Protein Infrared Spectra. *Molecules*, 2015, v. 20, pp. 12599–12622.
- [29] Loskutov S.R., Tyut'kova E.A., Plyashechnik M.A., Petrunina E.A., Shapchenkova O.A., Aniskina A.A. *Rannaya instrumental'naya diagnostika gribnykh infektsiy v drevesine* [Early instrumental diagnosis of fungal infections in wood]. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* [Siberian Forest J.], 2021, no. 6, pp. 39–45.
- [30] Fuente E., Menéndez J.A., Díez Díaz-Estébanez M.A., Suárez D. Infrared Spectroscopy of Carbon Materials: A Quantum Chemical Study of Model Compounds. *J. Phys. Chem.*, 2003, v. 107, pp. 6350–6359.
- [31] Tarasevich B.N. *Osnovy IK-spektroskopii s preobrazovaniem Fur'e. Podgotovka prob v IK-spektroskopii* [Fundamentals of Fourier transform IR-spectroscopy. Sample preparation in IR-spectroscopy]. Moscow: Moscow State University named after M.V. Lomonosova, 2012, 22 p.
- [32] Rodil S.E., Ferrari A.C., Robertson J., Muhl S. Infrared spectra of carbon nitride films. *Thin Solid Films*, 2002, no. 420–421, pp. 122–131.
- [33] Bornemann L. Rapid assessment of black carbon in soil organic matter using mid-infrared spectroscopy. *Organic Geochemistry*, 2008, v. 39(11), pp. 1537–1544.
- [34] Mongush G.R. *Issledovanie izmeneniya tekhnicheskikh pokazateley i khimicheskikh svoystv (metodom IK-spektral'nogo analiza) ugol'nykh smesey tuvinskikh mestorozhdeniy* [Study of changes in technical indicators and chemical properties (using the method of IR-spectral analysis) of coal mixtures of Tuvan deposits]. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy. Khimicheskie nauki* [International J. of Applied and Fundamental Research. Chemical Sciences], 2019, no. 12, pp. 157–162.
- [35] Parsi Z., Hartog N., Górecki T., Poerschmann J. Analytical pyrolysis as a tool for the characterization of natural organic matter – A comparison of different approaches. *J Anal Appl Pyrolysis*, 2007, v. 79, iss. 1–2, pp. 9–15.
- [36] Fengel D., Grosser D. Chemische Zusammensetzung von Nadel- und Laubhölzern. *Holz Roh Werkst*, 1975, v. 33, no. 1, pp. 32–34.
- [37] Trubetskaya A., Attard T.M., Budarin V., Hunt A. Supercritical extraction of biomass – a green and sustainable method to control the pyrolysis product distribution. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering is a Transformative Journal*, 2021, v. 9, pp. 5278–5287.
- [38] Dijkstra E.F., Boon J.J., van Mourik J.M. Analytical pyrolysis of a soil profile under Scots pine. *European J. of Soil Science*, 1998, v. 49, pp. 295–304.
- [39] Petrunina E.A., Ryazanova T.V., Aniskina A.A., Permyakova G.V., Stasova V.V. *Sravnitel'nyy analiz fiziko-khimicheskikh svoystv kory listvennitsy i sosny: termicheskiy analiz i analiticheskiy piroliz* [Comparative analysis of the physicochemical properties of larch and pine bark: thermal analysis and analytical pyrolysis]. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* [Siberian Forest J.], 2022, no. 4, pp. 35–49.
- [40] Loskutov S.R., Shapchenkova O.A., Petrunina E.A., Plyashechnik M.A., Tyut'kova E.A., Pashenova N.V., Grodnitskaya I.D., Aniskina A.A., Senashova V.A. *Diagnostika rannikh izmeneniy fiziko-khimicheskikh svoystv drevesiny pod deystviem gribnykh infektsiy* [Diagnostics of early changes in the physical and chemical properties of wood under the influence of fungal infections]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw materials], 2022, no. 2, pp. 61–72.
- [41] Valeeva A.R., Valiullina A.I., Bikbulatova G.M., Bashkirov V.N. *Umen'shenie massovoy doli svobodnogo formal'degida v fenoloformal'degidnykh smolakh s zameshcheniem fenola zhidkimi produktami piroliza drevesiny* [Reducing the mass fraction of free formaldehyde in phenol-formaldehyde resins by replacing phenol with liquid products of wood pyrolysis]. *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Woodworking industry], 2021, no. 3, pp. 94–102.
- [42] Rearus. Available at: <https://rearus.ru/> (accessed 24.06.2022).
- [43] Lazu. Available at: <https://lazu-newzealand.com/med-manuka> (accessed 29.06.2022).
- [44] *Khimicheskii portal* [Chemical portal]. Available at: <https://chemport.ru/> (accessed 29.06.2022).
- [45] Pat. 2154527 Russian Federation. *Sposob polucheniya buten-2-diola-1,4* [Method for producing butene-2-diol-1,4]. Matthias Irgang, publ. 20.08.00, 2021, 8 p.
- [46] Guliev A.M. *Modifikatsiya epoksidianovoy smoly epoksidalkeni-tsiklopropanami* [Modification of epoxy resin with epoxyalkene-cyclopropanes]. *Zhurnal prikladnoy khimii* [Journal of Applied Chemistry], 1978, no. 2, pp. 417–420.
- [47] Wikiето.ru. Available at: <https://wikiето.ru/wiki/a-2-Methoxy-4-vinylphenol> (accessed 30.06.2022).
- [48] Varma A.K., Mondal P. Pyrolysis of sugarcane bagasse in semi batch reactor: Effects of process parameters on product yields and characterization of products. *Industrial Crops and Products*, 2017, v. 95, pp. 704–717.

The work was performed within the framework of the state assignment No. 0287-2021-0011, Reg. RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTRE NO. 121031500335-2.

The equipment of the Krasnoyarsk Regional Centre for Collective Use of FIC KSC SB RAS was used in the study.

Author's information

Kazaryan Lilit Karenovna  — Engineer, Sukachev Institute of Forest SB RAS, Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center SB RAS», kazaryan.lk@ksc.krasn.ru

Loskutov Sergey Redzhinaldovich — Dr. Sci. (Chemistry), Fellow of the IAWS, Head of the Laboratory of Physicochemical Biology of Woody Plants, Sukachev Institute of Forest SB RAS, Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center SB RAS», lsr@ksc.krasn.ru

Shapchenkova Olga Aleksandrovna — Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Sukachev Institute of Forest SB RAS, Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center» SB RAS, sholga@ksc.krasn.ru

Plyashechnik Mariya Anatol'evna — Research Assistant, Sukachev Institute of Forest SB RAS, Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center SB RAS», lilwood@ksc.krasn.ru

Shimova Yuliya Sergeevna — Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor of the Department of Chemical technology of wood and biotechnology, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, shimovays@mail.sibsau.ru

Permyakova Galina Vasil'evna — Research Assistant, Sukachev Institute of Forest SB RAS, Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center SB RAS» permyakova.gv.@ksc.krasn.ru

Received 28.12.2022.

Approved after review 18.04.2023.

Accepted for publication 27.09.2023.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

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

The authors declare that there is no conflict of interest

ДРЕВЕСИНА КАК ХИМИЧЕСКОЕ СЫРЬЕ. ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННОСТЬ V. ДРЕВЕСНАЯ ЦЕЛЛЮЛОЗА КАК ПРИРОДНОЕ ПОЛИМЕРНОЕ СЫРЬЕ. ЧАСТЬ II

Г.Н. Кононов, А.Н. Веревкин✉, Ю.В. Сердюкова, В.А. Петухов

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1
verevkin@mgul.ac.ru

Рассмотрены вопросы истории развития химической переработки облагороженных технических древесных целлюлоз в целях получения на их основе аддитивных соединений, сложных и простых эфиров. Подробно изложена историческая трансформация технологии получения растительного пергамента, фибры, медно-аммиачного волокна, синтеза нитратов, ксантогенатов и ацетатов целлюлозы, а также методов переработки этих производных в целевые продукты и материалы. Приведено историческое описание получения и перспективы применения простых эфиров целлюлозы и модификации гидратцеллюлозных волокон. Настоящая статья является пятой в цикле «Древесина как химическое сырье. История и современность»; предыдущие части опубликованы в журнале «Лесной вестник» / Forestry Bulletin (2020, т. 24 № 1, № 5; 2021, т. 25 № 3; 2022, т. 26 № 1).

Ключевые слова: аддитивные соединения, нитраты целлюлозы, ксантогенаты целлюлозы, ацетаты целлюлозы, простые эфиры целлюлозы, привитые сополимеры

Ссылка для цитирования: Кононов Г.Н., Веревкин А.Н., Сердюкова Ю.В., Петухов В.А. Древесина как химическое сырье. История и современность. V. Древесная целлюлоза как природное полимерное сырье. Часть II // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 6. С. 98–113. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-98-113

*Окончание (начало «Лесной вестник / Forestry Bulletin»,
2023. Т. 27. № 3. С. 128–142.
DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-128-142) [1, 2]*

Получение ксантогенатов целлюлозы и их переработка

Получение следующего производного целлюлозы **ксантогената** связано с открытием в 1844 г. английским химиком Дж. Мерсером способа активации целлюлозы путем ее обработки 20%-м раствором гидроксида натрия «на холоду». Такой метод получения **алкалицеллюлозы** назвали **мерсеризацией**, что положило начало использованию ксантогенатов целлюлозы, открытых в 1891 г. тремя другими англичанами: Ч. Кроссом, Э. Бивеном и Дж. Бидлом путем обработки алкалицеллюлозы сероуглеродом [3, 4]. В 1893 г. Дж. Мерсер получил патент на производство **вискозы** — вязкого концентрированного раствора ксантогената целлюлозы в щелочном растворе. Впоследствии были выданы еще несколько патентов на использование вискозы для получения различных материалов. В 1898 г. Ч. Стерн в Германии впервые получил из вискозы искусственный шелк по **двухванному методу**, а в 1900 г. Г. Тофем запатентовал получение **вискозного шелка по центрифугальному методу**,

в 1905 г. Ч. Стерн и М. Мюллер взяли патент на применение бессульфитнокислой осадительной ванны при его получении.

Промышленное производство вискозного волокна началось в 1905 г. на фабрике в г. Ковентри в Англии, а в 1908 г. во Франции Ж. Бранденбергером были впервые получены пленки из регенерированной вискозной целлюлозы, впоследствии названные **целлофаном** [5–7].

Длительное время обсуждался вопрос о строении ксантогенатов целлюлозы. Ч. Кросс и Э. Бивен считали их молекулярными соединениями гидроксида натрия с натриевой солью кислого эфира целлюлозы и угольной кислоты, в 1928 г. П. Каррер, Ф. Хайзер и Т. Лизер опубликовали эмпирическую формулу ксантогенатов целлюлозы $-NaS-C-$, которая была подтверждена в работах Г. Гейгера, получившего в 1930 г. в результате обработки алкалицеллюлозы большим избытком сероуглерода ксантогенатов со степенью замещения $\gamma = 150$ [8–11]. И только в 1939 г. З.А. Роговину удалось синтезировать полностью замещенный ксантогенат целлюлозы со степенью замещения $\gamma = 300$ при использовании трехкратного избытка сероуглерода [12–16].

Предложение о необходимости развития производства вискозного волокна в России было впервые сделано Д.И. Менделеевым после посещения им промышленной выставки в Париже в 1900 г., на которой впервые демонстрировались образцы вискозного шелка. В российской газете «Речь» от 18 августа 1900 г. он писал: «Пожелаем, чтобы у нас скорее появилось производство вискозного шелка и распространилась широко... Если бы мы отбросы переработки древесины превратили изделия из вискозы, особенно волокна, то разбогатели бы побольше, чем от всей нашей торговли». Памятуя слова великого ученого, в 1909 г. в с. Большие Мытищи под Москвой (ныне г. Мытищи) англо-бельгийским акционерным обществом «Вискоза» был пущен первый завод вискозного волокна, на базе которого в 1930-е годы был основан Всесоюзный научно-исследовательский институт искусственного волокна (ВНИИВ) с опытным заводом и проектным институтом (ГИПРОИВ).

Работы по совершенствованию получения искусственного волокна были начаты в 1920-е годы П.П. Шорыгиным в Институте органической химии АН СССР (ныне Институт органической химии им. Н.Д. Зелинского РАН) и продолжены во ВНИИИВ Л.П. Жеребовым и в МХТИ им. Д.И. Менделеева (ныне Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева — РХТУ) З.А. Роговиным. В 1919–1924 гг. П.П. Шорыгин, автор монографий по органической химии, химии углеводов и химии целлюлозы, был профессором химического факультета Московского лесотехнического института, а Л.П. Жеребов, основоположник теоретических основ ЦБП, был его деканом [17–20]. Впоследствии З.А. Роговин занимал должность заведующего кафедрой Московского государственного текстильного института (ныне Московский государственный текстильный университет им. А.Н. Косыгина) [21].

На ранних этапах производства технология получения вискозы заключалась в мерсеризации листовой целлюлозы влажностью 6 % в течение 40...60 мин с последующим отжимом 100...200 кг алкалицеллюлозы в прессе при давлении 30 МПа до степени отжима 2,5...3,0. Впоследствии стали использовать **ванны-прессы** с загрузкой до 1000 кг целлюлозы для ее мерсеризации с последующим отжимом в них (рис. 1.) [12].

Мерсеризованные листы целлюлозы измельчались в аппаратах Вернера — Пфлейдерера периодического действия с зубчатыми лопастями в течение 2–3 ч с производительностью 10 000 кг/сут. (рис. 2) [12].

Мерсеризованная измельченная целлюлоза (алкалицеллюлоза) направлялась на **предсозревание**

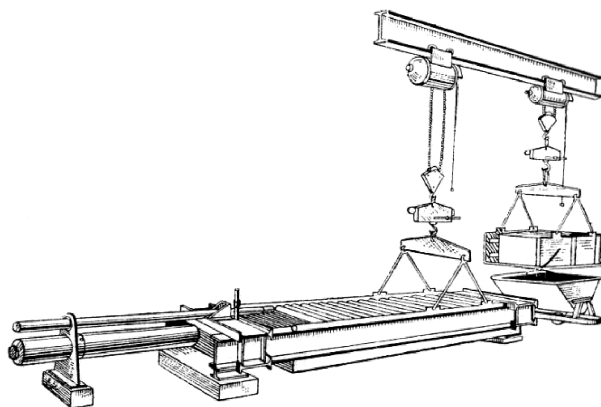


Рис. 1. Мерсеризационная ванна-пресс
Fig. 1. Mercerization bath-press

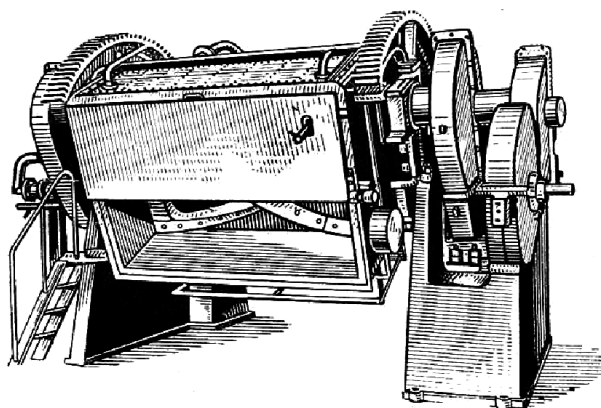


Рис. 2. Измельчитель периодического действия
Fig. 2. The discontinuous chopper

для снижения степени полимеризации в герметические железные ящики объемом 70...400 л продолжительностью от 2 до 3 сут. при температуре 23 °С. Впоследствии для этих целей стали использовать бункеры большего размера емкостью 3000...5000 л.

В 1950-е годы стали внедряться непрерывные способы мерсеризации с использованием более совершенного оборудования.

При непрерывной мерсеризации исходная целлюлоза использовалась в виде рыхлой массы, загружаемой вместе с раствором щелочи в смеситель объемом 2500...3000 л, снабженный вертикальной мешалкой, с производительностью 15000...25000 кг/сут. Продолжительность процесса составляла 10...15 мин. Непрерывный отжим осуществлялся на ситовых прессах, вакуум-фильтрах и шнек-прессах.

При непрерывном отжиме в шнек-прессах использовалась суспензия алкалицеллюлозы концентрацией до 10–12 % со степенью ее отжима до 3,0 и производительностью 30 000...40 000 кг/сут. (рис. 3) [12].

Измельчение алкалицеллюлозы при непрерывном способе осуществлялось в измельчителях,

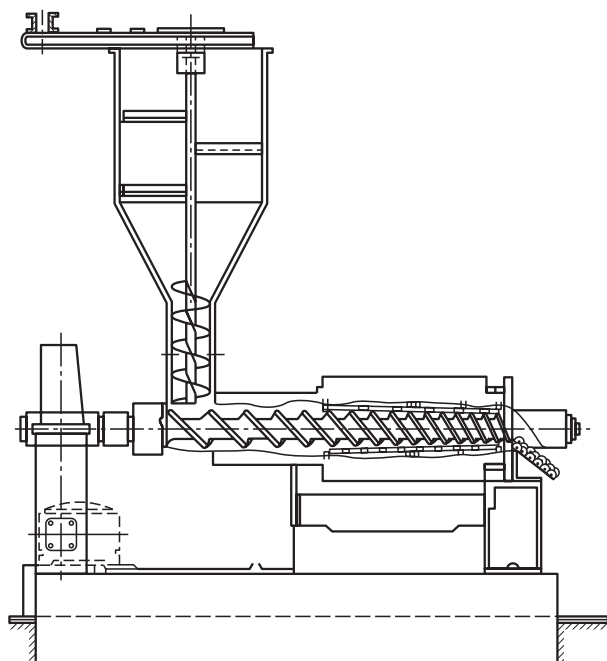


Рис. 3. Шнек-пресс для отжима алкалицеллюлозы
Fig. 3. Fiber press for alkalicellulose

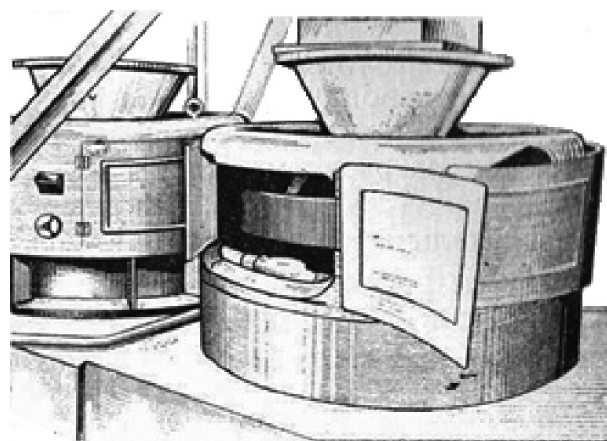


Рис. 4. Измельчитель непрерывного действия
Fig. 4. Shredding machine

работающих по принципу дисковых мельниц со скоростью вращения 800...2000 об./мин при времени измельчения 3...5 мин с производительностью 25 000...50 000 кг/сут. (рис. 4) [12].

Непрерывное предсозревание алкалицеллюлозы осуществлялось на нескольких пластинчатых качающихся транспортерах, расположенных один над другим с пересыпанием алкалицеллюлозы с верхних на нижние транспортеры, движущиеся со скоростью 8...37 м/ч при продолжительности процесса от 18 до 32 ч температуре 25 °С, влажности воздуха 90...92 % с производительностью до 60 000 кг/сут.

Использование вращающихся труб диаметром 2,7 м и длиной 30...40 м, установленных с уклоном 1° в сторону выгрузки алкалицеллюлозы

при их вращении со скоростью 10...15 об./ч и производительностью 30 000...60 000 кг/сут. позволяло сокращать продолжительность процесса до 12...24 ч за счет несколько повышенной температуры, поддерживаемой циркуляцией теплой воды в рубашке трубы [12].

После окончания процесса предсозревания алкалицеллюлоза подвергалась ксантогенированию в целях получения продукта с небольшой степенью замещения ($\gamma \leq 50$), хорошо растворимого в разбавленных щелочных растворах, путем обработки 32...40 % сероуглерода относительно массы целлюлозы в аппаратах периодического действия.

Первыми из таких аппаратов были **ксантбараны**. Они представляли собой шестигранные или цилиндрические барабаны вращающиеся со скоростью 1,5–2 об./мин с объемом от 3,8 до 8 м³ и загрузкой от 250 до 600 кг алкалицеллюлозы в них. Внутри ксантбарана имелась полая ось для подачи сероуглерода и удаления его избытка после ксантогенирования с помощью вакуума. Для терморегулирования аппарат снабжался водяной рубашкой и при температуре 25 °С процесс продолжался 2...2,5 ч, при температуре 35 °С и времени 1 ч, а при температуре 45 °С — 35 мин (рис. 5) [12].

Впоследствии стали использовать аппараты, в которых кроме барабанов ксантогенирования осуществляли частичное растворение продукта в разбавленном растворе щелочи. К таким аппаратам относятся **вакуумксантосмесители и ксантогенераторы**.

Вакуумксантосмеситель представляет собой герметичный термостатированный аппарат с двумя горизонтальными размещаемыми гладкими коленчатыми валами, вращающимися в разном направлении, и вертикальной пропеллерной мешалкой. Благодаря интенсивному перемешиванию время ксантогенирования при температуре 25 °С сокращалось до 1...1,5 ч, по окончании которого в аппарат вводилось необходимое количество щелочного раствора, затем перемешивание осуществлялось при дополнительном включении пропеллерной мешалки до полного растворения ксантогената в течение 2 ч с получением вязкого раствора. Данный аппарат имел объем от 7,5 до 30 м³ с загрузкой соответственно от 1500 до 6000 кг алкалицеллюлозы с общей продолжительностью мерсеризации и предварительным растворением ксантогената в течение 4,5...5 ч.

Ксантогенаторы представляли собой герметичные аппараты с горизонтальной мешалкой в виде восьмерки, рассчитанные на загрузку 750...800 кг, а впоследствии 5000...6000 кг алкалицеллюлозы и продолжительностью процесса ксантогенирования 1,5 ч, с последующим

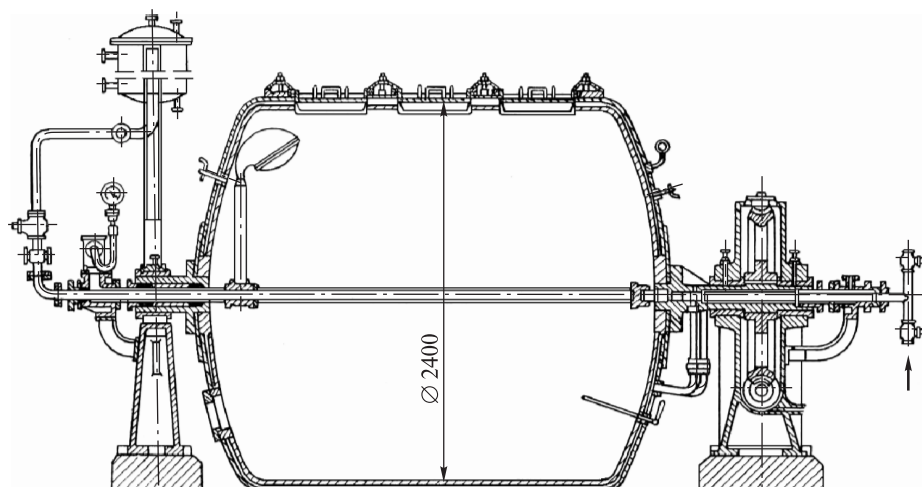


Рис. 5. Ксантбарабан
Fig. 5. Xanthusdrum

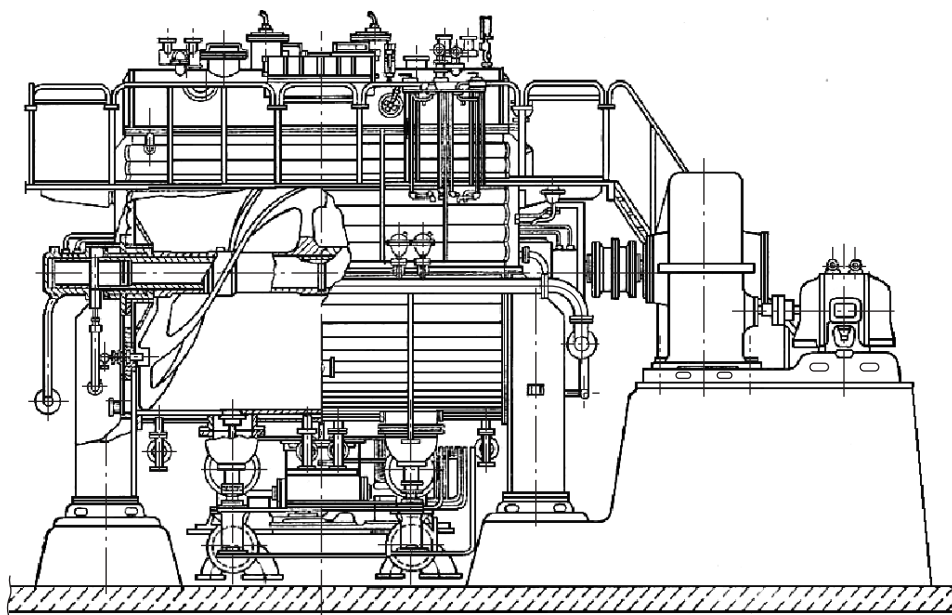


Рис. 6. Аппарат ВА–2
Fig. 6. The VA–2 apparatus

частичным растворением в щелочи в течение 7...10 мин и подачей получившейся пасты в **центрифугу-растиратель**. Из центрифуги-растирателя масса поступала в горизонтальный бак с мешалками для ее окончательного растворения при скорости вращения 40...50 об./мин, с образованиями вискозы в течение 2...3 ч, а впоследствии время сократили до 1...2 ч [12, 21].

В середине 1950-х годов группой инженеров под руководством М.Е. Могилевского было разработано и впоследствии внедрено устройство ВА–2, в котором осуществлялись непрерывная мерсеризация, предсозревание, ксантогенирование целлюлозы и растворение ксантогената с получением вискозы (рис. 6) [21].

В этом аппарате интенсификация процесса осуществлялась повышением температуры до 50...60 °С и применением раствора гидроксида натрия с концентрацией 25...28 % и последующим предсозреванием в течение 1...1,5 ч за счет введения в раствор щелочи небольшого количества пероксида водорода и солей кобальта. По окончании предсозревания, алкалицеллюлоза охлаждалась до 20...25 °С в течение 2...2,5 ч циркулирующей в охлаждающей рубашке аппарата раствора соли с температурой 8 °С и ксантогенировалась в течение 1 ч с последующим растворением ксантогената в течение 40 мин и превращением его в вискозу [12].

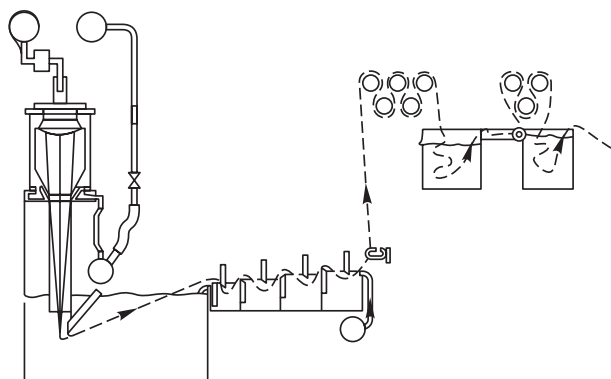


Рис. 7. Схема прядения вискозного штапельного волокна
Fig. 7. Viscose staple fiber spinning scheme

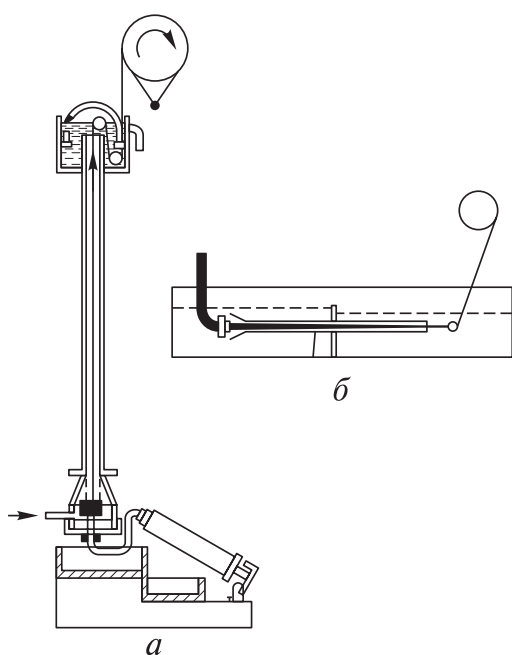


Рис. 8. Схема формирования кордной нити в трубке (а) и пластификационной ванне (б)

Fig. 8. The cord thread forming in a tube (a) and a stretch bath (b)

В 1970-е годы в СССР были разработаны и другие способы непрерывного ксантогенирования, доведенные до опытно-промышленного применения [21].

От момента получения вискозы до ее поступления в прядильную машину проходило обычно 18...30 ч, в течение которых она подвергалась нескольким фильтрациям на фильтр-прессах под давлением 0,15...0,2 МПа при температуре 40...45 °С и деаэрации при температуре 50...60 °С с разряжением до 600 мм рт. ст. В течение этого времени происходило «созревание» вискозы с понижением степени этерификации до $\gamma = 10...12$ и, как следствие, снижение устойчивости к действию коагулирующих растворов при прядении [21].

Прядение вискозного волокна осуществлялось двух- или однованным способом.

На ранних этапах развития производства шелкового вискозного волокна применялся только двухванный способ, по которому вискозный раствор пропусклся через никелевые фильтры в первую ванну, содержащую растворы гидросульфита или гидрокарбоната натрия для нейтрализации гидроксида натрия, в котором был растворен ксантогенат целлюлозы, осаждающийся при этом в виде волокна, которое поступало в дальнейшем во вторую ванну с разбавленной серной кислотой, гидролизующей ксантогенат целлюлозы в волокне до регенерированной гидратцеллюлозы с выделением сероуглерода и гидросульфата натрия.

Начиная с середины 1930-х годов на основе двухванного способа прядения были разработаны несколько новых вариантов. Так, в 1937 г. группой ученых, возглавляемых З.А. Роговиным, был предложен метод **бескислотного прядения**, при котором в первой ванне использовали не кислые соли, а средний сульфат аммония с концентрацией 20...36 %, превращающий гидроксид натрия в гидроксид аммония, в котором ксантогенат целлюлозы нерастворим, а во второй ванне использовалась 3–4%-я серная кислота.

В 1952 г. В.А. Каргин и группа сотрудников ВНИИИВ предложили **щелочной метод**, по которому во второй ванне гидролиз ксантогената происходит в щелочной среде в растворе гидроксида и сульфида натрия при температуре 100 °С. При этом образующийся токсичный сероуглерод и сероводород связываются в тиокарбонат и сульфит натрия и не выделяются в свободном виде, как это происходит в классическом случае.

Еще один вариант двухванного способа прядения «зрелых» концентрированных (до 12 %) растворов низкоэтерифицированных ксантогенатов целлюлозы ($\gamma = 10...12$) для получения, но уже не вискозного шелка «**рейона**», а штапельного волокна «**целлюлозной шерсти**» с большим вытяжением до 20 000 % (вместо 20...40 %) был заимствован из медно-аммиачной технологии получения волокна с вытягиванием в воронке, являющейся первой ванной сульфата аммония и второй — с раствором серной кислоты со скоростью прядения 30...40 м/мин при температуре 20 °С (рис. 7) [12].

Параллельно с двухванным способом и однованным способом к настоящему времени стал почти монопольным. По этому способу осаждение ксантогената целлюлозы и его разрушение с выделением регенерированной гидратцеллюлозы происходит в одной ванне с раствором, содержащим 11 % H_2SO_4 , 24 % Na_2SO_4 , 5 % $MgSO_4$ и 1,5...2 % $ZnSO_4$ при температуре 25...50 °С и использовании этерифицированных ксантогенатов целлюлозы ($\gamma = 25$) с применением фильтров из

золото-платинового сплава или тантала, иридия и палладия [12, 21, 22].

Для получения высокопрочного кордного волокна по однованному способу используют его формирование в трубках с движущимся осадительным раствором или в пластификационных ваннах с принудительной вытяжкой волокна от 60 до 150 % при температуре 80...90 °С в растворе, содержащем 0,5...0,6 % H_2SO_4 и 1...5 % сульфатов (рис. 8) [12, 21].

Скорость прядения по однованному способу составляет на бобинных машинах 65...90 м/мин, центрифугальных — 60...100 м/мин, на машинах непрерывного процесса, на которых после прядения волокна осуществляется формирование нити, его промывка, отделка и сушка, — 90...120 м/мин [21].

Применение современных отечественных машин непрерывного процесса ПН-100-ИЗ позволяет увеличить скорость прядения до 150...200 м/мин [21]. Время намотки волокна на бобину составляет примерно 10 ч, а его длина на ней примерно 50 000 м при производительности до 30 т/сут. [12].

В настоящее время для придания специфических свойств вискозные волокна модифицируются на разных стадиях технологического процесса в целях дальнейшего использования в различных технологиях их переработки. Модифицирование может осуществляться поверхностной этерификацией, химической сшивкой или синтезом привитых сополимеров.

Поверхностная этерификация (ацетилирование) осуществляется достаточно редко, и промышленное ее использование незначительно.

Химическая сшивка используется для снижения набухаемости волокон и придания несминаемости тканям из них. В качестве сшивающих нитей используют формальдегид, диэпоксисоединения и *N*-метилольные производные карбамида и меламина.

Наибольшее применение получили методы прививки синтетических полимеров к волокнам регенерированной целлюлозы. Так, прививка 35...40 % полиакрилонитрила (волокно «метилон») придает ему высокую устойчивость к развитию микроорганизмов, светостойкость и устойчивость к истиранию. Для повышения кислотостойкости (до 6...8 ч действия 72 % H_2SO_4) прививают полистирол или полибутадиев, для увеличения маслостойкости — фторсодержащие полимеры, а для придания огнестойкости используют фосфорсодержащие реагенты. Модифицированные волокна используют при производстве ковров, получении тканей для спецодежды, обивки мебели для самолетов и кораблей, театральных декораций и т. д.

Для создания ионообменных волокон используют прививку полиакриловой кислоты (катио-

ниты) или полиметилвинилпиридина (анионит) для последующего их использования при улавливании из промышленных стоков ионов золота, платины, ртути и очистки сахарных сиропов, патоки и т. д.

При прививке кальциевых солей акриловых кислот получают волокна для кровоостанавливающих материалов. Прививка полимеров, содержащих ионы серебра, дает материал для бактерицидного белья и фильтров для стерилизации воздуха, а прививка анальгетиков — препараты для пролонгированной анестезии [12].

Кроме гидратцеллюлозного волокна из ксантогенатов целлюлозы получают вискозную пленку — **целлофан**. Начало промышленного производства целлофана относится к 1913 г., когда оно было организовано во Франции на предприятии фирмы «ПоинтЦеллофанКомпани» с использованием щелевой формовочной машины, запатентованной Ж. Бранденбергером в Германии в 1910 г. [12, 22, 23].

В настоящее время эта пленка используется как упаковочный материал для пищевых продуктов и в виде оболочек для колбасных изделий, а также в декоративных целях. В 1930-е годы предпринимались попытки заменить ею кино- и фотопленку на нитроцеллюлозной основе, но она не выдержала конкуренции с пленкой из ацетата целлюлозы [23].

Процесс получения вискозной пленки аналогичен получению вискозного волокна, при этом используют ксантогенаты со степенью замещения $\gamma < 25$, которая достигается увеличением времени созревания до 80...100 ч, что продиктовано ее большей толщиной (20...50 мкм) по сравнению с диаметром элементарного волокна 5...7 мкм. Формование пленки осуществляется по однованному способу на пленочных машинах.

В начальный период производства на наших предприятиях пленку получали по **транспортиковому способу (способ Вольфа)**: раствор ксантогената целлюлозы наносили на поверхность вращающегося барабана, нижняя часть которого погружена в осадительную ванну с 15%-м раствором H_2SO_4 и температурой 40...45 °С. Впоследствии стали применять **целлофановый** способ с использованием пленочных машин Бранденбергера, заключающийся в продавливании раствора ксантогената через щелевидную чугунную фильеру с отполированными пластинами из легированного хромоникелевого сплава, зазор между которыми регулируется с точностью до 0,01 мм (рис. 9.) [22].

Сформованная пленка попадает в расположенный в три секции «барки» осадительной ванны, содержащие растворы серной кислоты и сульфата натрия с уменьшающимися концентрациями от

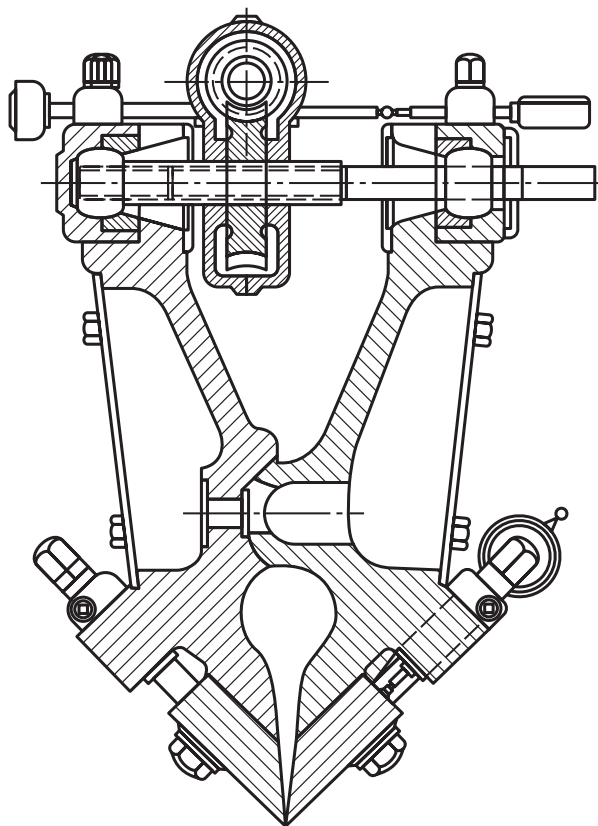


Рис. 9. Филъера для формирования вискозной пленки
Fig. 9. Nozzle for forming viscose film

13 до 2,5 % и от 20 до 4 % соответственно при температуре 40...45 °С.

Сформованная на пленочной машине целлюфановая пленка на ней же подвергается отделке, аналогично отделке на машине непрерывного процесса получения вискозного волокна, заключающейся в десульфурации в ванне с 0,2...0,25%-м раствором NaOH при температуре 80...90 °С и отбелке 0,25...0,35%-м раствором гипохлорита натрия, промывке, кислотке, окраске, пластификации 7%-м раствором глицерина при температуре 25...30 °С и сушке на 66 сушильных цилиндрах с постепенным понижением температуры от 75 до 20 °С и соответствующим понижением абсолютной влажности от 300...350 % до 7...8 %.

Высушенная пленка толщиной от 0,02 до 0,06 мм и массой от 30 до 100 г/м² сматывается в рулоны шириной 1250 мм и длиной намотной пленки до 1000 м [12].

Из ксантогенатов целлюлозы получают **искусственный конский волос**, используемый для набивки мягкой мебели, нетканые материалы, вискозную вату, пористые материалы такие как **искусственная замша и вискозная губка** (с 20-кратным удержанием воды) (глауберова соль используется в качестве порообразователя), и даже пластмассу **«вискоид»** [22].

Получение ацетатов и других эфиров целлюлозы

Следующими сложными эфирами целлюлозы стали ее ацетаты, впервые полученные в 1865 г. английским химиком П. Шютценбергером в результате обработки целлюлозы уксусным ангидридом в запаянных трубках при температуре 18 °С [23, 24]. Позднее А. Франшимон и Ш. Жерар в 1879 г. в реакции ацетилирования гидроцеллюлозы применили катализаторы — серную кислоту и хлорид цинка. В 1884 г. англичане Ч. Кросс и Э. Бивен в целях изготовления искусственного шелка в промышленном масштабе получили ацетат целлюлозы из гидратцеллюлозы регенерированной из ксантогената [4]. В 1899 г. И. Ледеру удалось ацетилированием гидроцеллюлозы получить технически приемлемые продукты для изготовления пленок, однако они не отличались достаточной прочностью. Полностью ацетилированная целлюлоза — триацетат — гомогенным способом был получен в 1901 г. А. Эйхенгрюном и Т. Беккером, впоследствии названный **первичным ацетатом**, а гетерогенным способом ацетилированием целлюлозы в среде бензола, он был получен Ледером в 1904 г. Также в 1904 г. американцем Э. Майлсом в Бостоне была подана заявка на патент получения ацетонорастворимого ацетата целлюлозы, но процесс не был подробно описан. А в 1905 г. А. Эйхенгрюном был взят патент на получение из первичного ацетата путем его частичного омыления хорошо растворимого в ацетоне **«вторичного ацетата»**, который положил основу его промышленного использования, поскольку для первичного ацетата еще не были найдены подходящие растворители.

В 1906 г. были проведены первые опыты по получению ацетатного лака — **«целлитлака»**. В 1907 г. А. Эйхенгрюн и Т. Беккер получили в промышленном масштабе ацетатный шелк **сухим способом (мокрый способ** был запатентован в Германии еще в 1901 г. Е. Вагнером и Э. Беваном. С 1908 г. заводы Байера начали регулярно выпускать ацетилцеллюлозы под названием **«целлит»**. С 1913 г. немецкая целлулоидная фабрика начала производство пластмассы **«целлон»**, а в Париже «Общество производства пластических материалов» начало выпуск **«зигоида»** на основе ацетилцеллюлозы.

Впоследствии во Франции появились ацетилцеллюлозные пластмассы **«Родонт»**, **«Спойдит»**, **«Целлостит»**, **«Целлонит»**, в США — **«Лумарит»**, а в Швейцарии **«Целлонит»** и т. д.

Негорючую киноленту начали производить фирмы **«ПАТЭ»** во Франции и **«Истемен — Кодак»** в США.

Первая мировая война дала толчок развитию целлюлозы и ацетилцеллюлозных авиалаков.

В 1920-е годы важнейшей областью применения ацетатов целлюлозы становится производство **ацетатного шелка**.

Процесс промышленного получения ацетатов целлюлозы заключался в приготовлении ацетилирующей смеси, ацетилировании целлюлозы с получением первичного ацетата, его частичное омыление до вторичного ацетата, осаждение вторичного ацетата, его промывка, сушка и измельчение.

Ацетилирующая смесь готовилась в вертикальных смесителях из алюминия или бронзы объемом 1000...2000 л, снабженных мешалками, змеевиками или рубашками для охлаждения смеси из равных объемов уксусного ангидрида и концентрированной уксусной кислоты с добавлением в качестве катализатора 10 % серной кислоты.

Ацетилирование проводилось в специальных аппаратах — **ацетиляторах**, представляющих собой мешалку и измельчающее устройство, изготовленное из бронзы, снабженное горизонтально распложенными мешалками с измельчающей зубчатой поверхностью, сопряженной с такой же зубчатой поверхностью на корпусе аппарата. При прямом движении мешалок происходило измельчение, при обратном — перемешивание. При объеме аппарата в 1000 л в него загружалось 100 кг целлюлозы и 800 л ацетилирующей смеси. Ацетиляторы были снабжены рубашками для нагрева/охлаждения и устройством опрокидывания для выгрузки в баки для омыления. Ацетилирование протекало в течение 5...7 ч при температуре 35...37 °С.

Частичное омыление первичного ацетата — **созревание** — проводили в алюминиевых или бронзовых баках емкостью 1000 л, установленных на тележках. Загрузка массы в них осуществлялась опрокидыванием в них ацетилятора и добавлением 50 л воды и 8...8,5 кг серной кислоты с последующей выдержкой при температуре 20...25 °С в течение 32...48 ч.

Осаждение вторичного ацетата проводилось в осадительных аппаратах из железа емкостью 3000 л с загрузочным люком для опрокидывания омылительных баков с добавлением 2000 л воды и перемешиванием с помощью двухскоростных мешалок.

Промывка охлажденной ацетилцеллюлозы, отжатой на центрифугах до 40...50 % влажности осуществлялась 2–3-кратной обработкой сначала горячей — 40...45 °С, а затем холодной водой по принципу противотока в чанах с 400-кратным объемом воды, с добавлением соды и последующим отжимом на центрифугах.

Сушка ацетилцеллюлозы в слое толщиной ~20 мм проводилась при температуре 80...100 °С

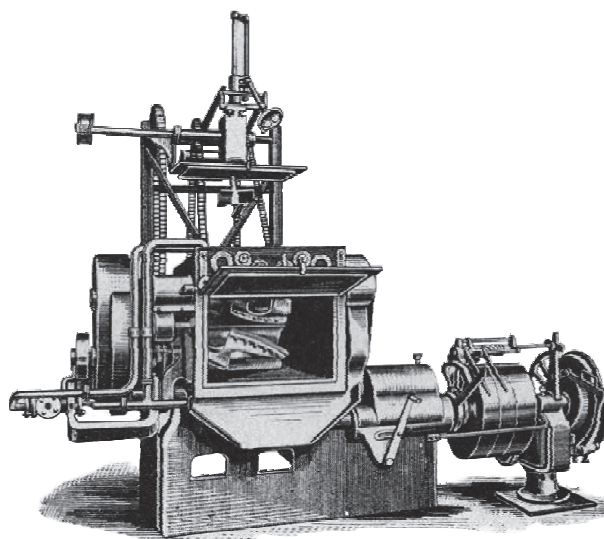


Рис. 10. Аппарат «КомбиноАцетилцеллюлоза»
Fig. 10. The device «Kombinoacetilcellulose»

в камерных сушилках периодического действия или в ленточных сушилках непрерывного действия до влажности 5–6 %, после чего ацетилцеллюлоза измельчалась на мельницах ударного действия.

В 1930-е годы для интенсификации производства использовали аппараты комплексного действия «КомбиноАцетилцеллюлоза» объемом 5700 л, в которых постадийно проводились ацетилирование, омыление, осаждение и первая промывка ацетилцеллюлозы (рис. 10) [23].

Полученный вторичный ацетат целлюлозы с содержанием 53,5...56 % ацетильных групп ($\gamma = 240...260$) использовался для получения пластических масс, перерабатываемых целлулоидным методом (**ацелоид, целлулит, целластоид, целлулоид, новолит, ойоцетил, целлозит** и т. д.), для получения небьющихся стекол для автомобилей и дирижаблей, палубных покрытий, защитных очков и масок, триплекса, проволочного стекла — **целлогласа** и т. д. [25].

Из ацетатцеллюлозных пресс-порошков изготавливали прессованием и литьем под давлением различные материалы (**ацетолоид, пластин, литеин, целластин** и т. д.), а также детали телефонной и радиопромышленности и даже небьющиеся грамофонные пластины взамен «шеллачных» [25].

Лаки на основе ацетилцеллюлозы в виде растворов в ацетоне, метилацетате и диоксане использовали для обработки тканей, несущих поверхностей аэропланов и дирижаблей, для изоляции проводов в электродвигателях, покрытия бумажной разовой посуды, обоев, изготовления клеенки взамен высыхающих масел, аппретирования тканей вместо крахмала и даже при консервировании яиц.

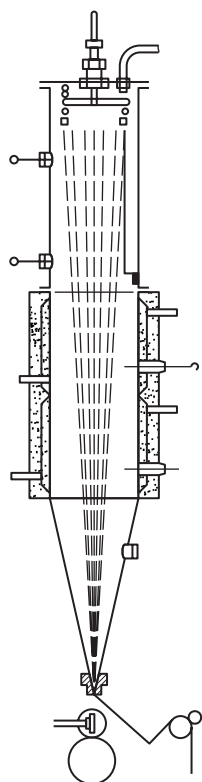


Рис. 11. Аппарат для сухого прядения ацетатного шелка

Fig. 11. Acetate silk dry spinning device

Первые пленки пытались получить из раствора первичного ацетата целлюлозы ($\gamma = 300$) в хлороформе, но начиная с 1908 г. стали использовать для этих целей ацетоновые растворы на цилиндрических и ленточных машинах для производства тонких упаковочных пленок.

Затруднения в нанесении фотоэмульсии несколько затормозили производство кино- и фотопленки из ацетатов целлюлозы, и только разработка технологии нанесения промежуточного слоя, обеспечивающего прилипание светочувствительного слоя, позволило расширить их производство в 1930-е и, особенно, в 1940-е годы. Это позволило в начале 1950-х годов полностью отказаться от горючих нитропленок [25].

Наибольшее применение вторичные ацетаты нашли в получении **ацетатного шелка**. Первые образцы ацетатного шелка из первичного ацетата методом **мокрого прядения** в водных осадительных ваннах из уксусного кислого или хлороформного растворов были получены на опытной установке фирмы «Фюрст-Хенкель» еще в 1898 г. по технологии Вагнера, впоследствии запатентованной в 1901 г. в Германии.

Основной патент на получение ацетатного шелка методом **сухого прядения** из ацетоновых растворов вторичного ацетата был получен в 1906 г. А. Эйхенгрюном, и уже в 1907 г. он совместно с Т. Беккером изготовил первую партию ацетатного шелка на фабрике в г. Юлих (Германия).

Однако масштабное производство ацетатного шелка по этому методу началось только после

Первой мировой войны на фабриках фирмы «Бритиш целлонез» в Англии, на которых во время войны изготовлялось большое количество ацетатцеллюлозных лаков для аэропланов. К тому времени была решена проблема крашения этого материала и регенерации растворителей, используемых в его производстве.

Сухое прядение осуществлялось на прядильных машинах, снабженных вертикальными металлическими шахтами высотой 3...3,5 м, нижняя часть которых снабжалась водяной рубашкой для подогрева воздуха, поступающего снизу, а сверху через фильеру подавался ацетоновый раствор вторичного ацетата, который формовался в волокна при испарении растворителя и в виде нитей шелка наматывался на бобины со скоростью до 200 м/мин (в отличие от 30...40 м/мин при мокром прядении) (рис. 11) [12].

В результате широкого распространения этой технологии уже к концу 1920-х годов ацетатный шелк из первичного ацетата, полученный по мокрому способу, выпускался во многих странах под фирменными названиями: «Шелк Целанез» в Англии и Канаде, «Шелк Зетиллоз» во Франции, «Шелк Ацета» в Германии и «Шелк Листрон» в США постепенно вытесняя с рынка нитрошелк [25, 26].

В 1930-е годы в СССР обширные исследования проводили З.А. Роговин с сотрудниками во ВНИИВ, где была организована опытная станция, положившая в стране начало разработкам в области получения и применения ацетатов целлюлозы.

В 1940–1950-е годы второе рождение получила технология производства триацетата после организации промышленного выпуска метилхлорида в качестве растворителя взамен уксусной кислоты по гомогенному способу. Объемы горизонтальных ацетиляторов, для его получения снабженных рамными мешалками и рубашками для циркуляции охлаждающего рассола с температурой 5...10 °С, возрастали до 30 000 л, а скорости прядения — до 350 м/мин (рис. 12) [12, 21, 256].

Промышленно был освоен и гетерогенный способ получения ацетатов целлюлозы в среде бензола, толуола или четыреххлористого углерода с использованием хлорной кислоты в качестве катализатора. Процессы осуществлялись с применением ацетиляторов в виде горизонтальной центрифуги с перфорированным барабаном объемом 5000...7000 л и скоростью вращения в разных режимах от 12...14 об./мин до 400 об./мин, укрепленном над полом вала с перфорациями, через которые подавались внутрь барабана с целлюлозой активизирующие, ацетилирующие и промывающие жидкости (рис. 13) [5].

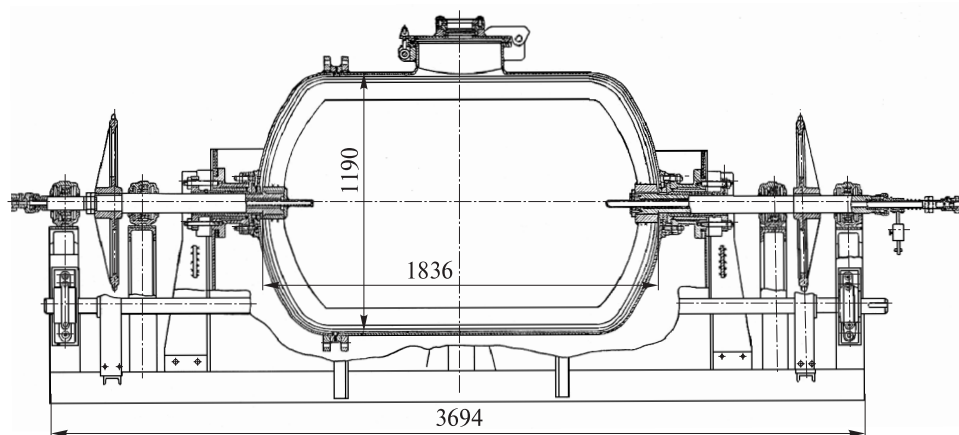


Рис. 12. Ацетилятор для гомогенного ацетилирования
Fig. 12. Acetylator for homogeneous acetylation

В середине 1950-х годов в некоторых странах, включая СССР, были созданы заводы по производству волокна из триацетата целлюлозы. В частности, в 1952 г. в нашей стране начался масштабный выпуск триацетатных кино-, фото- и магнитных пленок и полностью прекратилось производство горючих пленок из нитратов целлюлозы. СССР вышел на второе место после США по их производству [27].

В 1960-е и 1970-е годы в СССР, Японии и США началось внедрение непрерывной схемы производства ацетатов целлюлозы по гомогенному способу с введением операции активации уксусной кислотой и стабилизации добавлением 1...1,5 % концентрированной серной кислоты в готовый ацетат целлюлозы для разрушения сернокислотных эфиров (рис. 14) [27].

При этом вводилось использование аппаратов шнекового и полочного типов для осуществления стадий технологического процесса (рис. 15) [27].

В 1970-е годы была разработана схема получения ацетатов целлюлозы гетерогенным способом с орошением целлюлозного слоя ацетилирующей смесью в стационарном режиме или на движущемся сетчатом конвейере, которые были внедрены в 1980-е годы, а также способы парофазного ацетилирования для получения высокопрочных нитей — **тохалон** (Япония) [27].

Бурное развитие химии целлюлозы как природного полимера и основы для синтеза полимерных материалов в начале XX в. обусловило создание серии продуктов на основе не только сложных, но и простых эфиров целлюлозы. [28, 29]. В Англии в 1912 г. Л. Лилиенфельдом впервые был получен этиловый эфир целлюлозы в результате обработки щелочной целлюлозы хлористым этилом. Широкомасштабное производство **этилцеллюлозы** началось в 1930-е годы. Применение этого эфира в военной технике

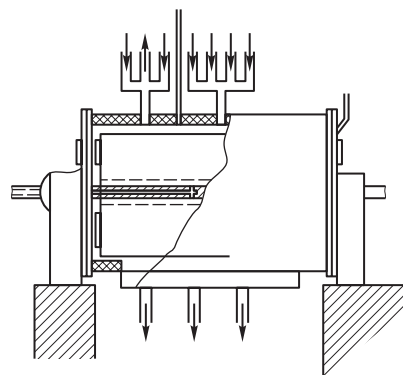


Рис. 13. Ацетилятор для гетерогенного ацетилирования
Fig. 13. Acetylator for heterogeneous acetylation

связано с хорошей устойчивостью и совместимостью с нитроглицерином, нитроцеллюлозой и «черным» порохом для изготовления взрывателей снарядов. В гражданских технологиях этилцеллюлоза перерабатывается в изделия под давлением с вакуум-формованием и экструзией. Из него изготавливают фурнитуру автомобилей, хоккейные доспехи, корпуса телефонных аппаратов, детали текстильных машин и т. д. Лаки на основе этого эфира используются для консервации металлических деталей сложной формы, для покрытия бумаги и кожи, аппретирования тканей, для растворения красителей при глубокой печати. Пленки из этилцеллюлозы применяются в качестве упаковочного материала в пищевой и фармацевтической промышленности [5].

Следующий эфир — **метилцеллюлоза** — был получен в Англии в 1914 г. Промышленное производство в этой стране было начато в 1939 г. путем обработки мерсеризованной целлюлозы хлористым метилом. В СССР этот эфир начали выпускать в 1970 г. При показателе $\gamma = 150...200$ этот полимер является водорастворимым, что и определяет его применение в качестве загустителя,

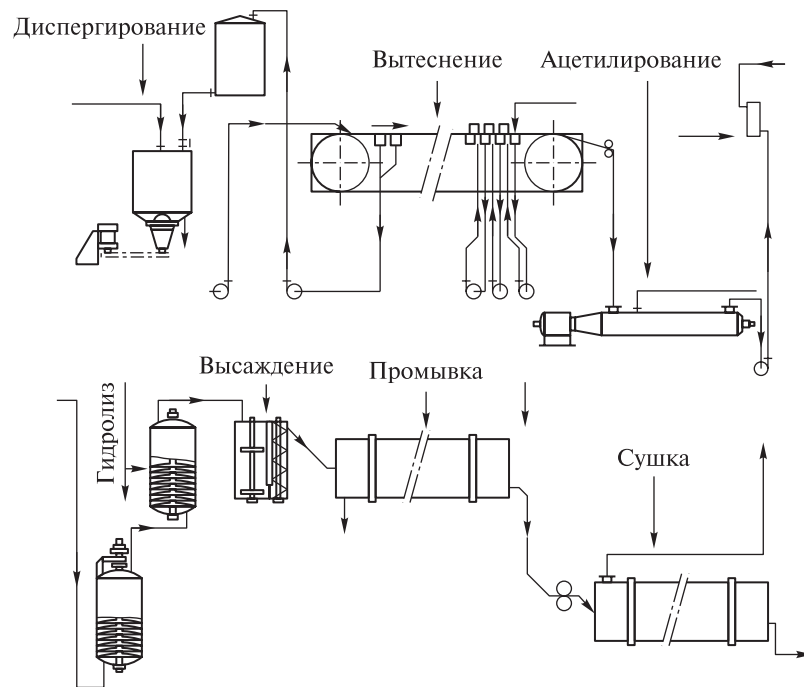


Рис. 14. Схема производства ацетат целлюлозы по непрерывному гомогенному способу

Fig. 14. The production scheme of cellulose acetate by a continuous homogeneous method

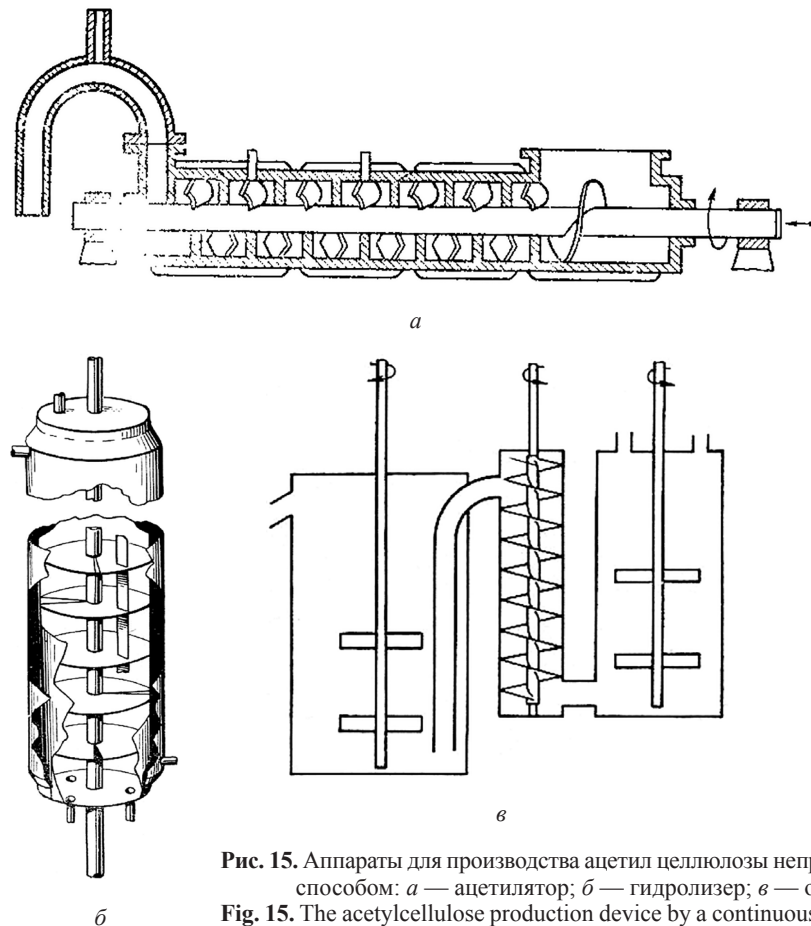


Рис. 15. Аппараты для производства ацетил целлюлозы непрерывным гомогенным способом: а — ацелилятор; б — гидролизер; в — осадитель

Fig. 15. The acetylcellulose production device by a continuous homogeneous method: а — acetylator; б — hydrolyser; в — precipitator

эмульгатора и стабилизатора при обработке тканей, производстве мелованной бумаги в процессах эмульсионной полимеризации, фармацевтике и косметологии [5].

В 1918 г. Е. Янсен получил **карбоксиметилцеллюлозу** путем обработки целлюлозы монохлоруксусной кислотой в спиртовом растворе гидроксида натрия. В СССР технология получения натриевой соли была разработана в 1959 г. группой ученых под руководством К.Ф. Жигача. Она заключалась в обработке щелочной целлюлозы хлорацетатом натрия в твердой фазе. Применение водорастворимой Na-КМЦ чрезвычайно обширно: в производстве моющих средств, при обработке тканей, в качестве загустителя для печатных красок, для стабилизации бурильных суспензий при обогащении руд, в керамическом и целлюлозно-бумажном производствах, фармацевтической промышленности и в производстве кино- и фотоматериалов [5].

Первый патент на получение **оксиэтилцеллюлозы** был получен в Германии Б. Хубертом в 1920 г., однако полупромышленный процесс ее получения обработкой щелочной целлюлозы оксидом этилена был осуществлен в 1923 г. в Англии, а промышленное производство началось с 1930-х г. и в Англии, и США. Оксиэтилцеллюлоза используется как загуститель при производстве красок фотоэмульсий и защитных коллоидов [5].

В 1938 г. в Германии был взят первый патент на новый продукт — **цианоэтилцеллюлозу (ЦЭЦ)**, получаемую действием акрилонитрила на щелочную целлюлозу. Это производное целлюлозы даже при низких степенях замещения обладает высокой биостойкостью. Поэтому уже в 1940 г. С. Макгрегор в Англии, а также А. Хойт и Л. Стеллинг (США) детально изучили условия синтеза и спроектировали оборудование, на котором в 1953 г. была выпущена первая партия этого продукта. Применение ЦЭЦ связано с ее свойствами, используемыми при производстве электрооборудования, работающего в тропическом климате, зимостойких тканей и специальных гнилоустойких покрытий [5].

Позднее, в 1960–1980-е годы, в разных странах были получены многочисленные смешанные сложные и простые эфиры с комплексом ценных свойств для применения в различных технологиях и областях техники.

В 1990-е годы в Японии был получен модификатор целлюлозы — *N*-оксид-*N*-метилморфолин, переводящий ее в термопластичное состояние. В настоящее время это позволяет использовать целлюлозу для формирования гидратцеллюлозного и углеродных волокон, а также высокотемпературных изделий из **стеклоуглерода** (табл. 1, 2) [21, 22].

Данные табл. 2 наглядно характеризуют динамику изменений удельного веса различных искусственных волокон на основе целлюлозы до момента начала массового производства волокон из синтетических полимеров [4, 12, 16].

Производство волокон из регенерированной целлюлозы и ее производных занимает главенствующее место в химической переработке технических целлюлоз, составляя около 90 % производства всех материалов, полученных из них.

Т а б л и ц а 1

Мировое производство натуральных и искусственных волокон в период 1896–1970 гг., тыс. т

World production of natural and artificial fibers in 1896–1970, thousands of tons

Год	Шелк	Шерсть	Хлопок	Искусственное волокно
1896	17,0	–	–	0,6
1904	21,0	–	–	3,3
1916	29,7	–	–	13,5
1920	29,3	1114	4478	20,0
1925	47,6	1543	6048	80,0
1930	59,6	1678	5630	207,0
1935	–	1652	4500	441,0
1940	–	–	–	1116,0
1950	19,0	1055	5816	1557,5
1960	30,0	1444	10212	2600,0
1970	40,0	1510	12828	4150,0

Т а б л и ц а 2

Удельный вес производства искусственных волокон на основе целлюлозы за период 1896–1950 гг., %

The specific weight of the production of artificial fibers based on cellulose in 1896–1950, %

Вид искусственного волокна	1896	1906	1913	1928	1932	1935	1940	1950
Вискозный шелк	–	7	60	82,8	88,1	87,6	89,4	81,1
Ацетатный шелк	–	–	–	8,4	7,5	8,75	7,9	16,7
Медно-аммиачный шелк	–	40	13	4,9	3,5	3,6	2,5	2,0
Нитрошелк	100	53	27	3,9	0,9	0,05	–	–

На долю лаков, пластических масс, порохов и т. п. приходится не более 10 % мирового производства эфиров целлюлозы [22]. Однако использование нитроцеллюлозы в военных целях и в качестве пленкообразователя при производстве различных лакокрасочных материалов, ацетатцеллюлозы как основы для производства негорючей кино-, фото- и магнитной пленок, вискозы для производства биоразлагаемых упаковочных материалов свидетельствует о важности и перспективности этих традиционных методов химической переработки целлюлозы, в том числе и о получении ее новых производных с уникальными свойствами и областями применения.

Двухсотлетний путь, пройденный с момента открытия целлюлозы в начале XIX в. технологиями ее химической переработки в качестве единственного полимерного сырья для получения многих материалов вплоть до середины XX в. позволяет прогнозировать широкомасштабное использование этого возобновляемого экологически чистого биополимера в химических технологиях будущего.

Выводы

Анализ исторического развития процессов химической переработки технических древесных целлюлоз позволяет сделать следующие выводы.

1. С начала XIX в. и до середины XX в. хлопковая целлюлоза являлась монопольным крупномасштабным полимерным сырьем для химической переработки.

2. Облагороженные древесные целлюлозы являются альтернативой хлопковой целлюлозе как химического сырья.

3. Аддитивные соединения целлюлозы, как сырье для получения растительного пергамента, фибры и медно-аммиачного волокна постепенно утрачивают свое технологическое значение.

4. Нитраты целлюлозы являются важным сырьем в некоторых военных технологиях и лакокрасочной промышленности.

5. Ксантогенаты целлюлозы, наряду с ацетатами, являются незаменимым сырьем для получения экологичных биоразлагаемых волокон, тканей и пленок.

6. Химическое модифицирование гидратцеллюлозных волокон позволяет придавать им водостойкость, несминаемость, светостойкость, кислото- и маслостойкость, бактерицидные, ионообменные и другие ценные свойства.

7. Простые эфиры целлюлозы являются значимым сырьем для получения пластмасс, водорастворимых полимерных композиций, биостойких материалов и других перспективных продуктов.


Список литературы

- [1] Кононов Г.Н., Веревкин А.Н., Сердюкова Ю.В., Хвалько Д.Д. Древесина как химическое сырье. История и современность. V. Древесная целлюлоза как природное полимерное сырье. Часть I // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 3. С. 128–142. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-128-142
- [2] Кононов Г.Н., Веревкин А.Н., Сердюкова Ю.В., Миронов Д.А. Древесина как химическое сырье. История и современность. IV. Делигнификация древесины как путь получения целлюлозы. Часть I // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 1. С. 97–113. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-1-97-113
- [3] Пузырев С.А., Бурова Т.С., Кречетова С.П., Рыжов П.Т. Технология обработки и переработки бумаги и картона. М.: Лесн. пром-сть, 1985. 312 с.
- [4] Разумеев А.А. Справочник по производству искусственного волокна / под ред. А.И. Меоса. М.: ОНТИ, 1937. 516 с.
- [5] Бытенский В.Я., Кузнецова Е.П. Производство эфиров целлюлозы / под ред. Н.И. Кленковой. Л.: Химия. 1974. 206 с.
- [6] Яценкова О.В., Скрипников А.М., Карачаров А.А., Мазурова Е.В., Воробьев С.А., Кузнецов Б.Н. Новый метод получения микрофибриллированной целлюлозы из древесины ели // Химия растительного сырья, 2020. № 1. С. 303–314.
- [7] Степина И.В., Содомон М., Кононов Г.Н., Петухов В.А. Компонентный состав модифицированного растительного сырья // Инженерный вестник Дона, 2022. № 9 (93). С. 223–231.
- [8] Корнев П.П., Максимов А.А., Баранова А.Е., Осовская И.И. Получение целлюлозы из растительного сырья // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: матер. VII Всероссийской научно-технической конференции. Санкт-Петербург, 2022. С. 198–199.
- [9] Кононов Г.Н., Веревкин А.Н., Сердюкова Ю.В. Микелиз древесины, его продукты и их использование // Сб. тезисов докл. Междунар. симп. МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана «Лесной комплекс в цифровой экономике». М.: Научные технологии, 2019. С. 89–90.
- [10] Никитина З.К., Гордонова И.К. Изучение целлюлазной активности коллекционных штаммов мицелиальных грибов // Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии, 2022. Т. 25. № 11. С. 29–35.
- [11] Минес К. Бензилцеллюлоза и другие простые и сложные эфиры целлюлозы. М.: Гослестехиздат, 1936. 117 с.
- [12] Роговин З.А. Химия и технология искусственных волокон. М.: Гизлегпром, 1952. 676 с.
- [13] Гесс К. Химия целлюлозы и ее спутников / пер. с нем. З. Роговина, А. Пакшвер / под ред. и с доп. проф. П. Шорыгина. Л.: Госхимтехиздат, 1934. 620 с.
- [14] Кононов Г.Н. Дендрохимия. Химия, нанохимия и биогеохимия компонентов клеток тканей и органов древесных растений: в 2 т. М.: МГУЛ, 2015. Т. 1. 480 с.
- [15] Словарь целлюлозно-бумажного производства / Е.М. Беркман, С.М. Вишневецкий, Л.О. Иоффе / под ред. Н.В. Рюхина. М.: Лесная пром-сть, 1969. 299 с.
- [16] Васильев Д.Н. Производство фибры. М.–Л.: Гослестбу-миздат, 1959. 170 с.
- [17] Аким Э.Л., Перепечкин Л.П. Целлюлоза для ацетилирования и ацетаты целлюлозы. М.: Лесн. пром-сть, 1971. 232 с.
- [18] Голдинг Б. Химия и технология полимерных материалов / пер. с англ. В.В. Арнольдова / под ред. Н.Т. Романченко. М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. 666 с.

- [19] Закошиков А.П. Нитроцеллюлоза. М.: Оборонгиз, 1950. 372 с.
- [20] Киттель Г. Целлюлозные лаки / под ред. Е.Ф. Беленького. Л.: Госхимиздат, 1957. 327 с.
- [21] Роговин З.А. Основы химии и технологии химических волокон. В 2 т. М.: Химия, 1974. Т. 1. 518 с.
- [22] Хувинк Р., Ставерман А. Химия и технология полимеров. В 2 т. М.; Л.: Химия 1966. Т. 2. 1124 с.
- [23] Ушаков С.Н. Эфиры целлюлозы и пластические массы на их основе. Л.: Госхимиздат, 1941. 502 с.
- [24] Пен Р.З. Технология целлюлозы. Красноярск: Изд-во СИБГТУ, 2006. Т. 1. 343 с.; Т. 2. 349 с.
- [25] Филатова А.Е., Сульман А.М., Шиманская Е.И., Гребенникова О.В., Монжаренко М.А. Влияние свойств полимерной матрицы катализатора на процесс переработки растительной биомассы // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Химия, 2023. № 1 (51). С. 45–50.
- [26] Luginina A.A., Kuznetsov S.V., Alexandrov A.A., Gainutdinov R.V., Petukhov D.I., Voronov V.V., Chernova E.V., Fedorov P.P. High lignin content cellulose nanofibrils obtained from thermomechanical pulp // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*, 2022. Т. 13. № 6. С. 698–708.
- [27] Хакимова Ф.Х., Носкова О.А., Котельников С.А., Синяев К.А. Получение природного полимерного материала для использования в энергонасыщенных композициях // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника, 2019. № 56. С. 72–82.
- [28] Косточко А.В., Валишина З.Т., Дебердеев Р.Я. Особенности структуры и свойств нитратов пеньковой целлюлозы // Пластические массы, 2019. № 9-10. С. 41–44.
- [29] Крюгер Д. Ацетилцеллюлоза и другие органические эфиры целлюлозы / под ред. З.А. Роговина. М.: Изд-во ГОНТИ, 1938. 448 с.

Сведения об авторах

Кононов Георгий Николаевич — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), академик РАЕН, уч. секретарь секции «Химия и химическая технология древесины» РХО им. Д.И. Менделеева, kononov@mgul.ac.ru

Веревкин Алексей Николаевич  — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), verevkin@mgul.ac.ru

Сердюкова Юлия Владимировна — ст. преподаватель МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), caf-htdip@mgul.ac.ru

Петухов Владимир Алексеевич — студент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал)

Поступила в редакцию 27.12.2022.

Одобрено после рецензирования 11.04.2023.

Принята к публикации 20.10.2023.

WOOD AS CHEMICAL RAW MATERIAL. HISTORY AND MODERNITY

V. WOOD PULP AS NATURAL POLYMER RAW MATERIAL. PART II

G.N. Kononov, A.N. Verevkin✉, Yu.V. Serdyukova, V.A. Petukhov

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

verevkin@mgul.ac.ru

The development history of the chemical processing of treated industrial wood pulps in order to obtain addition compounds, esters and simple ethers on their basis is considered. The historical transformation of the technology to obtain vegetable parchment, fibre, copper-ammonia fibre, synthesis of nitrates, xanthogenates and cellulose acetates, as well as methods of processing these derivatives into desired products and materials are described in detail. A historical description of how it was prepared and future prospects to apply cellulose ethers and hydrated cellulose fibres modification is given. The present article is the fifth in the cycle «Wood as a chemical raw material. History and Modernity»; the previous parts were published in the journal Forestry Bulletin (2020, vol. 24 no. 1, no. 5; 2021, vol. 25 no. 3; 2022, vol. 26 no. 1).

Keywords: additive compounds, cellulose nitrates, cellulose xanthogenates, cellulose acetates, cellulose esters, grafted copolymers

Suggested citation: Kononov G.N., Verevkin A.N., Serdyukova Yu.V., Petukhov V.A. *Drevesina kak khimicheskoe syr'e. Istoriya i sovremennost'. V. Drevesnaya tsellyuloza kak prirodnoe polimernoe syr'e. Chast' II* [Wood as chemical raw material. History and modernity. V. Wood pulp as natural polymer raw material. Part II]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2023, vol. 27, no. 6, pp. 98–113. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-98-113


References

- [1] Kononov G.N., Verevkin A.N., Serdyukova Yu.V., Khval'ko D.D. *Drevesina kak khimicheskoe syr'e. Istoriya i sovremennost'. V. Drevesnaya tsellyuloza kak prirodnoe polimernoe syr'e. Chast' I* [Wood as chemical raw material. History and modernity. V. Wood pulp as natural polymer raw material. Part I]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2023, vol. 27, no. 3, pp. 128–142. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-128-142
- [2] Kononov G.N., Verevkin A.N., Serdyukova Yu.V., Mironov D.A. *Drevesina kak khimicheskoe syr'e. Istoriya i sovremennost'. IV. Delignifikatsiya drevesiny kak put' polucheniya tsellyulozy. Chast' I* [Wood as chemical raw material. History and modernity. IV. Wood delignification to produce cellulose. Part I]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2022, vol. 26, no. 1, pp. 97–113. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-1-97-113
- [3] Puzyrev S.A., Burova T.S., Krechetova S.P., Ryzhov P.T. *Tekhnologiya obrabotki i pererabotki bumagi i kartona* [Paper and cardboard processing and recycling technology]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forestry industry], 312 p.
- [4] Razumeev A.A. *Spravochnik po proizvodstvu iskusstvennogo volokna* [Handbook on the artificial fiber production]. Ed. A.I. Meos. Moscow: ONTI, 1937, 516 p.
- [5] Bytenskiy V.Ya., Kuznetsova E.P. *Proizvodstvo efirov tsellyulozy* [Production of cellulose esters]. Ed. N.I. Klenkova. Leningrad: Chemistry: Leningrad Branch, 1974, 206 p.
- [6] Yatsenkova O.V., Skripnikov A.M., Karacharov A.A., Mazurova E.V., Vorob'ev S.A., Kuznetsov B.N. *Novyy metod polucheniya mikrofibrillovannoy tsellyulozy iz drevesiny eli* [A new method for obtaining microfibrillated cellulose from spruce wood]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw materials], 2020, no. 1, pp. 303–314.
- [7] Stepina I.V., Sodomon M., Kononov G.N., Petukhov V.A. *Komponentnyy sostav modifitsirovannogo rastitel'nogo syr'ya* [Component composition of modified plant raw materials]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2022, no. 9 (93), pp. 223–231.
- [8] Kornev P.P., Maksimov A.A., Baranova A.E., Osovskaya I.I. *Poluchenie tsellyulozy iz rastitel'nogo syr'ya* [Obtaining cellulose from vegetable raw materials]. *Lesa Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie. materialy VII Vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii* [Forests of Russia: politics, industry, science, education. materials of the VII All-Russian Scientific and Technical Conference]. St. Petersburg, 2022, pp. 198–199.
- [9] Kononov G.N., Verevkin A.N., Serdyukova Yu.V. *Mikoliz drevesiny, ego produkty i ikh ispol'zovanie*. Collection of abstracts of the international symposium of the MF Bauman Moscow State Technical University «Forest Complex in the digital Economy». Moscow: Scientific Technologies, 2019, pp. 89–90.
- [10] Nikitina Z.K., Gordonova I.K. *Izuchenie tsellyulaznoy aktivnosti kollektsonnykh shtammov mitselial'nykh gribov* [Study of the cellulase activity of collection strains of filamentous fungi]. *Voprosy biologicheskoy, meditsinskoy i farmatsevticheskoy khimii* [Questions of Biological, Medical and Pharmaceutical Chemistry], 2022, v. 25, no. 11, pp. 29–35.
- [11] Mines K. *Benziltsellyuloza i drugie prostye i slozhnye efiry tsellyulozy* [Benzylcellulose and other simple and complex cellulose esters]. Moscow: Goslestehizdat, 1936, 117 p.
- [12] Rogovin Z.A. *Khimiya i tekhnologiya iskusstvennykh volokon* [Chemistry and technology of artificial fibers]. Moscow: Gilegprom, 1952, 676 p.
- [13] Gess K. *Khimiya tsellyulozy i ee sputnikov* [Pulp chemistry and its satellites]. Ed. P. Shorygina. Leningrad: Goskhimtekhnizdat, 1934, 620 p.
- [14] Kononov G.N. *Dendrokhiimiya. Khimiya, nanokhiimiya i biogeokhiimiya komponentov kletok tkaney i organov drevesnykh rasteniy* [Dendrochemistry. Chemistry, nanochemistry and biogeochemistry of components of tissue cells and organs of woody plants], in 2 v. Moscow: MGUL, 2015, v. 1, 480 p.
- [15] *Slovar' tsellyulazno-bumazhnogo proizvodstva* [Dictionary of pulp and paper production] / E.M. Berkman, S.M. Vishnevsky, L.O. Ioffe. Ed N.V. Ryukhin. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forestry industry], 1969, 299 p.

- [16] Vasil'ev D.N. *Proizvodstvo fibry* [Production of fiber]. Moscow–Leningrad: Goslesbumizdat, 1959, 170 p.
- [17] Akim E.L., Perepechkin L.P. *Tsellyuloza dlya atsetilirovaniya i atsetaty tsellyulozy* [Cellulose for acetylation and cellulose acetates]. Moscow: Forest Industry, 1971, 232 p.
- [18] Golding B. *Khimiya i tekhnologiya polimernykh materialov* [Chemistry and technology of polymer materials]. Ed. N.T. Romanchenko. Moscow: Publishing House of Foreign Literature, 1963, 666 p.
- [19] Zakoshchikov A.P. *Nitrotsellyuloza* [Nitrocellulose]. Moscow: Publishing house and printing house Oborongiz, 1950, 372 p.
- [20] Kittel' G. *Tsellyuloznye laki* [Cellulose varnishes]. Ed. E.F. Belenky. Leningrad: Goskhimizdat, 1957, 327 p.
- [21] Rogovin Z.A. *Osnovy khimii i tekhnologii khimicheskikh volokon* [Fundamentals of chemistry and technology of chemical fibers] [For universities]. In 2 vol. Moscow: Himiya [Chemistry], 1974, v. 1, 518 p.
- [22] Khuvink R., Staverman A. *Khimiya i tekhnologiya polimerov* [Chemistry and technology of polymers]. In 2 vol. Moscow–Leningrad: Publishing House Chemistry, 1966, v. 2, 1124 p.
- [23] Ushakov S.N. *Efiry tsellyulozy i plasticheskie massy na ikh osnove* [Cellulose esters and plastic masses based on them]. Leningrad: Goskhimizdat, 1941, 502 p.
- [24] Pen R.Z. *Tekhnologiya tsellyulozy* [Pulp Technology]. Krasnoyarsk: SIBGTU, 2006, v. 1, 343 p; v. 2, 349 p.
- [25] Filatova A.E., Sul'man A.M., Shimanskaya E.I., Grebennikova O.V., Monzharenko M.A. *Vliyanie svoystv polimernoy matritsy katalizatora na protsess pererabotki rastitel'noy biomassy* [Influence of the properties of the polymer matrix of the catalyst on the processing of plant biomass]. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Khimiya* [Bulletin of the Tver State University. Series: Chemistry], 2023, no. 1 (51), pp. 45–50.
- [26] Luginina A.A., Kuznetsov S.V., Alexandrov A.A., Gainutdinov R.V., Petukhov D.I., Voronov V.V., Chernova E.V., Fedorov P.P. High lignin content cellulose nanofibrils obtained from thermomechanical pulp. *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*, 2022. T. 13. № 6. C. 698–708.
- [27] Khakimova F.Kh., Noskova O.A., Kotel'nikov S.A., Sinyayev K.A. *Poluchenie prirodnogo polimernogo materiala dlya ispol'zovaniya v energonasyschennykh kompozitsiyakh* [Obtaining natural polymeric material for use in energy-saturated compositions]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika* [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Aerospace Engineering], 2019, no. 56, pp. 72–82.
- [28] Kostochko A.V., Valishina Z.T., Deberdeev R.Ya. *Osobennosti struktury i svoystv nitratov pen'kovoy tsellyulozy* [Features of the structure and properties of hemp cellulose nitrates]. *Plasticheskie massy* [Plastic masses], 2019, no. 9–10, pp. 41–44.
- [29] Kryuger D. *Atsetiltsellyuloza i drugie organicheskie efiry tsellyulozy* [Acetylcellulose and other organic cellulose esters]. Ed. Z.A. Rogovin. Moscow: GONTI, 1938, 448 p.

Authors' information

Kononov Georgiy Nikolaevich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), Corresponding Member of the Russian Academy of Natural Sciences, the Scientific Secretary of section «Chemistry and engineering chemistry of wood» RHO of D.I. Mendeleev, kononov@mgul.ac.ru

Verevkin Aleksey Nikolaevich  — Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), verevkin@mgul.ac.ru

Serdyukova Yulia Vladimirovna — Senior Lecturer of the BMSTU (Mytishchi branch), caf-htdip@mgul.ac.ru

Petukhov Vladimir Alekseevich — student of the BMSTU (Mytishchi branch)

Received 27.12.2022.

Approved after review 11.04.2023.

Accepted for publication 20.10.2023.

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

ТИПИЗАЦИЯ ФАКТОРНЫХ МНОЖЕСТВ ОБЪЕКТОВ ЛЕСНОГО КОМПЛЕКСА И ПРЕДПРОЕКТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИХ РАЗМЕЩЕНИЯ

С.Б. Якимович✉, А.В. Мехренцев

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

yakimovichsb@m.usfeu.ru

Представлен критический анализ известных работ по проблематике типизации в лесном комплексе и выделения однородных множеств на основе кластерного анализа. Сформулирована проблема типизации природно-производственных условий и параметрически известной системы лесных машин, с одной стороны, и отсутствия производного множества недвижимых объектов в виде лесных дорог, промышленных площадок и др., размещаемых на арендуемых лесных участках — с другой. Определена эффективность заготовки древесины на основе модифицирования методики рационального объединения (пересечения) и типизации множеств природно-производственных условий лесных участков, известной системы машин заготовки и транспорта древесины, а также рекомендаций по рациональному множеству лесных дорог, размещенных промышленных площадок и др. объектов для транспортных, погрузочно-разгрузочных, обрабатывающих и информационных функций, реализуемых на арендуемых лесных участках. Выполнены модифицирование и практическая промышленная апробация методики, отличающейся от известных включением обрабатывающих транспортно-перегрузочных множеств локальных объектов лесного комплекса, параметрически заданной системы лесных машин, а также множеств лесных участков.

Ключевые слова: лесные участки, производное множество локальных объектов, природно-производственные условия, кластеризация

Ссылка для цитирования: Якимович С.Б., Мехренцев А.В. Типизация факторных множеств объектов лесного комплекса и предпроектное обоснование их размещения // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 6. С. 114–125. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-114-125

Актуальность рассматриваемой темы заключается в повышении эффективности систем заготовки древесины посредством системного подхода к типизации и группировке лесных объектов, снимающих неполное и частичное описание лесных промышленных систем. В частности в работе [1] в историческом и текущем исследовательских аспектах [2, 3] представлены генетическое и динамическое направления типологии в связи с влиянием антропогенных факторов и управлением ими посредством системы лесохозяйственных мероприятий, выборочных рубок или типов вырубок без рекомендаций по управлению техногенной составляющей по критерию снижения техногенного воздействия. Представленная группировка по типу леса и лесорастительным условиям, которая носит описательно-объяснительный характер, однородных или биологически равноценных групп для условий роста и производительности древостоев, не содержит информации о наиболее целесообразных системах машин и иных производственных условиях, определяющих эффективность заготовки древесины и иные функции леса с ограничениями на неистощительное лесопользование.

Вопросы типизации подобных множеств, включая технические системы, в отрасли занимают достаточно давно [4–14], однако методики их применения не в полной мере отражают требования практики. Иначе, в известные процедуры и результаты типизации не включены все возможные факторные множества объектов системы лесопользования, в том числе и систем заготовки древесины.

Типизация природно-производственных условий заготовки древесины и постановка в соответствие им систем машин на основе систематизации, лесопромышленного районирования и оценочных матриц применимости машин в определенных условиях рассмотрены в работах [4–6]. Типизация выполнена практически по всем возможным на тот период, факторам лесных объектов, за исключением требований сохранения лесной среды, факторов качественного характера и отсутствия формализации объединения или пересечения множеств природно-производственных условий и технологий заготовки древесины. Отметим также, что реализовано это применительно к иерархическому уровню страны, что влечет за собой значительные отклонения по соответствию систем машин для какого-либо конкретного предприятия, его лесных участков и возможное

существенное снижение эффективности применения выбранных машин, а в ряде случаев и отрицательный эффект.

В работах [7, 8] представлена методика выделения нескольких однородных групп лесосек на основе кластерного анализа или наиболее распространенной однородной группы лесосек посредством выбора закона распределения параметров и постановки в соответствие им систем машин на основе разработанных параметрических рядов на уровне крупного и малого предприятий. Однако отсутствует подход к группировке по качественным признакам.

В работах [9, 10] рассмотрен оригинальный математический аппарат типизации (таксономии) на уровне региона (федерального округа), выполнена типизация. Однако нет сравнительной оценки данного подхода и других известных способов, отсутствует конечный результат — нет методики обоснования машин и способов заготовки древесины, соответствующих полученным типам природно-производственным условий.

Работа [11] носит экспериментальный характер. В ней на основе кластерного анализа выполнено выделение параметрически однородных групп предмета труда в целях эксперимента и объединение однородных множеств пиловочника с множеством диаметров пиловочника и координат размещения сучьев. Факторы качества в этой работе не учитывались.

Работы [12, 13] представили типизацию природно-производственных условий заготовки древесины на уровне региона, как и работы [4–6], но отличаются дополнительными факторами типизации, использованием стандартных методов кластерного анализа и имеют недостатки, отмеченные ранее.

На основе приведенного анализа разработан способ, развивающий известные подходы, который реализован в методике типизации природно-производственных условий [14] арендованных лесных участков, с одной стороны, и параметрически однородных групп лесных машин и способов заготовки древесины с параметрами этих условий — с другой, для их последующего рационального совмещения (пересечения). Методика параметрической и качественной группировки однородных множеств объектов в системе лесного комплекса в целях пересечения множеств, реализуемая в данном подходе, основана на кластерном анализе. Необходимость в подобной методике типизации и объединения однородных объектов (множеств) лесной инфраструктуры обусловлена обоснованием наиболее эффективных систем, обеспечивающих заготовку древесины с учетом неистощительного лесопользования, сохранения продуктивности лесной среды. Под объектами

здесь понимаются составляющие технологии заготовки и транспорта древесины — предмет труда (лесной участок, дерево, хлыст, сортимент и т. д.), средства преобразования и перемещения предмета труда (оборудование, машины и т. д.) и способы преобразования, действия или процессы, преобразующие предмет труда, логистика транспорта древесины, включающая транспортные пути, промежуточные и иные погрузочно-разгрузочные промежуточные площадки, склады первичной переработки (в дальнейшем объекты лесного комплекса). Рациональная группировка и выделение однородных объектов лесного комплекса предполагает их пересечение и применение к полученным производным группам различных способов повышения эффективности, параметрической, структурной и функциональной оптимизации.

Отличие данной методики типизации заключается в ее ориентированности на конечный результат и адаптации к изменяющимся в пространстве и времени промышленно-лесным системам: к разнообразию природно-производственных условий, системам машин, инфраструктуре недвижимости, правилам неистощительного лесопользования и другим факторам, включая новые факторы с соответствующими им новыми множествами. Иными словами, типизация на основе предлагаемой методики рассматривается не как нечто неизменяемое, догматическое, а как развивающееся, уточняемое и дополняемое явление, и в связи с учетом изменений реализующее гибкий подход к получению результата в определенных пространственных и временных интервалах.

В практике проектирования объектов лесного комплекса и освоения новых лесных участков возникают задачи, которые требуют уточнения содержания данной методики. Например, задачи, в которых помимо параметрических и функциональных объединяемых множеств природно-производственных условий и технологий с системами машин для заготовки древесины появляются объекты инфраструктуры в виде лесных дорог, промышленных площадок и других объектов, размещаемых на арендуемых лесных участках для выполнения транспортных, погрузочно-разгрузочных, обрабатывающих и информационных функций [15]. Так, появляются задачи факторного анализа этих объектов инфраструктуры и наиболее рационального проектирования, географического размещения и объединения или пересечения с известными множествами природно-производственных условий и технологий для заготовки древесины.

Выделим подобные объекты лесопромышленной инфраструктуры как локальные обрабатывающие транспортно-перегрузочные множества недвижимых объектов. К таким множествам

относятся лесные дороги и промышленные площадки, группируемые с арендуемыми лесными участками и параметрически описываемыми природно-производственными условиями, в том числе по объемам перерабатываемой и пропускаемой древесины, при ограничениях на существующие системы машин конкретных предприятий, логистику и запреты на размещение в определенных лесных участках.

Отметим также, что в подвергнутых краткому анализу работах локальные обрабатывающие транспортно-перегрузочные множества недвижимых объектов не рассмотрены и не известны как объекты группировки на предмет соответствия природно-производственным условиям и технологиям для заготовки древесины.

Представленный краткий анализ содержания публикаций определяет проблему практической значимости, связанной с отсутствием в методике типизации и группировки [14, 15] локальных обрабатывающих транспортно-перегрузочных множеств недвижимых объектов, на предмет их создания и размещения в рациональной системе, реализующей определенный конечный продукт или продукты заготовки древесины.

На основе изложенного выше можно прийти к заключению о необходимости развития данной методики.

Цель работы

Цель работы — повышение эффективности заготовки древесины на основе модификации методики рационального объединения (пересечения, выделения) и типизации множеств объектов лесного комплекса.

Материалы и методы

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- выполнен анализ способов группировки объектов лесного комплекса;
- представлены их достоинства и недостатки относительно качества группировки;
- реализовано модифицирование методики рационального объединения (пересечения, выделения) и типизации множеств объектов лесного комплекса;
- выполнена практическая апробация методики в рамках госбюджетной и хоздоговорной научно-исследовательской работ [14, 16, 17].

Методологическая основа исследований определялась системным подходом, объединившим применительно к объектам исследования инвариантные методы кластеризации, квалиметрии, теории нечетких множеств, математической статистики, параметрические ряды, методы теории множеств. Использовалась также методика типизации природно-производственных условий [14]

арендованных лесных участков с одной стороны и параметрически однородных групп лесных машин и способов заготовки древесины с параметрами этих условий с другой.

Системный подход реализован посредством системного представления факторов разнообразия всех возможных множеств объектов лесного комплекса.

При этом учтены ограничения на способы преобразования и перемещения предмета труда заготовки древесины и параметры машин в соответствии с требованиями неистощительного лесопользования, сохранения продуктивности лесной среды.

Методы кластеризации, использованные в работе, представлены апробированными эффективно работающими стандартными способами. Под кластером понимают группу объектов, обладающих свойством отделимости от других кластеров по плотности (плотность объектов внутри кластера выше, чем вне его), дисперсии, форме, которые определяются выбранным расстоянием между параметрами объекта [18]. Расстояние между объектами является мерой сходства (расхождения). Расстояния могут представляться в натуральных или безразмерных (стандартизованных единицах). Евклидово расстояние — наиболее общий тип расстояния. Оно является геометрическим расстоянием в многомерном пространстве и вычисляется следующим образом

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^p (x_{ik} - x_{jk})^2}, \quad (1)$$

где d_{ij} — расстояние между объектами i и j ;

x_{ik} — значение k -й переменной для j -го объекта.

Евклидово расстояние (и его квадрат) вычисляется по исходным, а не по стандартизованным данным. Кроме евклидова расстояния могут использоваться расстояния городских кварталов, метрики Чебышева, Минковского и др. Однако в дальнейшем по изложенным основаниям в кластеризации используется евклидово расстояние. В практическом примере реализуется евклидово расстояние.

При объединении расстояния между объектами определяются выбранной мерой. Стандартно объединение в однородные группы реализуется следующими способами.

Одиночная связь (метод ближайшего соседа). В этом методе расстояние между двумя кластерами определяется расстоянием между двумя наиболее близкими объектами (ближайшими соседями) в различных кластерах и результирующие кластеры имеют тенденцию быть представленными длинными «цепочками».

Метод *K*-средних. Этот метод кластеризации существенно отличается от предыдущего метода тем, что для его применения требуется предварительное знание количества кластеров. Метод *K*-средних строит *K* заданных кластеров, расположенных на возможно больших расстояниях друг от друга.

В практической апробации для предварительного анализа используется метод ближайшего соседа, для уточнения типизации и объединения — метод *K*-средних.

Метод квалиметрического анализа предназначен для количественной оценки качественных факторов объекта и в данном случае носят экспертный характер. Качественные оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» или «отлично — плохо» переводятся в количественные безразмерные оценки на основе, например, обобщенной функции Харрингтона.

Более точными, но и более сложными в реализации аналогичной задачи, являются методы теории нечетких (распльвчатых, пушистых) множеств, основанных на лингвистической переменной Л.А. Заде [19]. В практической апробации эти методы использованы для описания качественных факторов и последующего перевода их в количественные, например, для перевода в квалиметрические значения следующих качественных показателей: 1) наличие или отсутствие на лесном участке дорог с твердым покрытием; 2) общая граница со смежным лесным участком или участками.

Параметрические ряды в практической апробации использованы для описания параметров известных систем машин и их применения для совмещения с множеством природно-производственных условий лесных участков и локальных обрабатывающих транспортно-перегрузочных производных множеств недвижимых объектов.

Методы математической статистики использовались в рамках описательной статистики при определении статистических оценок рассматриваемых множеств и как встроенные элементы кластерного анализа [20].

Методика типизации [14] использовалась как основа для модифицирования методики рационального объединения (пересечения, выделения) и типизации множеств объектов лесного комплекса. Алгоритм методики подробно изложен в работе [14] и содержит следующие шаги.

1. Формулирование цели группировки, выбор и обоснование количественных и качественных факторов группировки. Разработка методики и сбор данных для выделения однородных множеств.

2. Приведение к стандартизованному виду при необходимости.

3. Обоснование способа перевода качественных факторов в количественные показатели на основе квалиметрии или методов нечетких множеств.

4. Обоснование метрики и меры расстояния между множествами параметров множества объектов лесного комплекса в их многопараметрическом описании.

5. Выбор метода объединения объектов лесного комплекса в кластеры из возможных стандартных. (Выполняется на основе предварительного тестирования и сравнения качества полученных кластеров как разведочный анализ).

6. Кластеризация и выделение кластеров, определение количества кластеров.

7. Уточнение статистических оценок для полученного количества кластеров на основе метода *K*-средних. При необходимости (кластеры не соответствуют физической сущности, полученные кластеры имеют различия сравнительно с разведочным анализом и т. д.) возврат к шагу 4. В противном случае анализ кластеров и выделение из множества объектов лесного комплекса, которые подлежат совмещению и образуют систему.

8. Совмещение (пересечение, объединение) полученных множеств в соответствии с поставленной целью на основе повторного кластерного анализа или методов теории множеств. Например, кластеризация однородных групп природно-производственных условий, с одной стороны, и однородных групп или параметрических рядов лесных машин — с другой. При необходимости приложение к полученной системе одних и тех же способов, методов, моделей оптимизации, обеспечивающих повышение их эффективности по различным критериям.

Данная методика типизации и группировки позволяет реализовать объединение всех составляющих предметно-функциональных частей технологии заготовки и обработки древесины, в том числе и недвижимых объектов для любого уровня иерархии систем заготовки и обработки древесины, начиная с минимальной — лесосеки, а — при необходимости — выполнить разработку оптимальной или рациональной технологии, рассматриваемой как развивающееся, уточняемое и дополняемое явление в определенные пространственные и временные интервалы.

При выполнении практической апробации модифицированной методики нами были использованы материалы и требования к содержанию в соответствии с техническим заданием заказчика, связанные с переработкой листового и хвойного дровяного сырья в щепу на промышленных площадках, географически определяемых и примыкающих к существующим дорогам, лесным участкам или группе лесных участков, а также

с последующей транспортировкой древесины (щепы, деловых сортиментов) по дорогам общего пользования, в частности:

1) материалы инвестиционного проекта ООО «Синергия» [21], информация о технических характеристиках систем машин «харвестер — форвардер» с максимальным расстоянием трелевки не более 3000 м, технология двухступенчатой вывозки сортиментов на базе сортиментовозов Урал-4320 (первая ступень) и двуприцепных автолесовозов и щеповозов для транспортировки древесины по дорогам общего пользования;

2) требования к объемам переработки низкокачественной древесины на щепу различного назначения, маркам и характеристикам мобильных рубильных машин и щеповозов, единице времени — календарному году, территориальной основе представления исходных данных — лесным участкам (объемы представляются в натуральном выражении);

3) к перечню лесничеств, границ, информации о товарной структуре по материалам последних лесохозяйственных регламентов лесничеств Свердловской обл. [22] с характеристиками арендуемых лесных участков (39 участков) ООО «Синергия», существующему географическому структурированию лесных участков, лесным участкам, находящимся в аренде: к объему запаса по лиственному (пиловочнику лиственному, балансу лиственному, дровам лиственным) и хвойному (дровам) хозяйствам;

4) к предполагаемым маршрутам транспортировки сырья, видам транспорта (автомобильному, железнодорожному), кратчайшему расстоянию (в метрах) вывозки сырья по квартальным просекам от условных центров лесных участков до дороги с твердым покрытием;

5) материалы по наличию или отсутствию дороги с твердым покрытием для каждого из лесных участков (доступность лесных участков, в условных единицах), необходимости строительства лесовозной дороги с твердым покрытием.

Результаты и обсуждение

Используемая в практической апробации методика отличается от указанной в разделе «Материалы и методы» тем, что для типизации и объединения заданных систем машин заготовки, транспортировки древесины и ее переработки на щепу применяются факторные множества лесных участков материалов заказчика (см. раздел «Материалы и методы») и возможные локальные обрабатывающие транспортно-перегрузочные множества недвижимых объектов. Иначе говоря, в изменяемой методике на основе типизации предполагается поиск возможных размещений локальных обрабатывающих транспортно-пере-

грузочных производных множеств недвижимых объектов, объединенных с множествами лесных участков при заданном множестве системы машин.

Формализовано [23] данная методика представляется следующим выражением операций пересечения и последующего объединения однородных групп производных множеств локальных обрабатывающих транспортно-перегрузочных лесных объектов

$$\text{МПО}_{ij} = \bigcup_{i,j}^n (\text{МПУ}_i \cap \text{МСМ}_j), \quad (2)$$

где МПО_{ij} — производное ij -е множество локальных обрабатывающих транспортно-перегрузочных лесных объектов;

МПУ_i — i -е лесные участки с присущими им природно-производственными условиями; МСМ_j — j -е, параметрически заданные системы машин и способы заготовки древесины; n — количество локальных обрабатывающих транспортно-перегрузочных лесных объектов.

В связи с тем что типизация выполнена на основе кластерного анализа в программной среде Statistica [24], поясняющие рисунки и таблицы представляются в виде копий экранов (рис. 1–3).

В соответствии с алгоритмом методики, изложенной в работе [14] шаги 1–5 представлены ниже, за исключением шага 2. В приведении к стандартизованному виду нет необходимости. Выполнение перевода качественных факторов в количественные показатели реализовано на основе простейшей квалитметрической шкалы порядка согласно работе [25] по следующим факторам: 1) наличию или отсутствию на лесном участке дорог с твердым покрытием, отражаемых в виде большого положительного (10 000 у. ед.) и минимального (1 у. ед.) чисел; 2) общей границе со смежным лесным участком или участками, отражаемой рядом чисел одного порядка с остальными показателями для группировки с соответствующей градацией (числа порядка 103 с этой же градацией) (рис. 1, столбцы 5, 6). При необходимости в зависимости от степени реализации поставленной цели квалитметрические значения корректируются.

Исходя из изложенного выше, для кластеризации в качестве первичного принимается метод одиночной связи (метод ближайшего соседа) для предварительной оценки количества кластеров. Впоследствии для уточнения и проверки качества выделенных кластеров, метод K -средних. При кластеризации для всех методов используется евклидово расстояние. Кластеризация проводится для 39 участков по шести параметрам (см. рис. 1).

Участковые лесничества и участки	Кластеризация лесных участков ООО "Синергия" (2021 год, один объект - один участок)					
	1 Пилоочник лиственный м ²	2 Балансы лиственные м ³	3 Дровяная древесина м ³	4 Расстояние до ближайшей действующей дороги с покрытием, м	5 Наличие или отсутствие дороги с покрытием, усл. единицы	6 Граница со смежным участком, усл.ед
Н-Т, Висимское участковое лесничество Висимо - Уткинский участок	1871,3	1798,5	4993,0	8000,0	10000,0	1000,0
Н-Т, Висимское участковое лесничество Сулемский участок	373,4	358,9	996,3	13000,0	10000,0	1000,0
Н-Т, Висимское участковое лесничество урочище ГЗЗ "Висимский"	1096,5	1053,9	2925,8	2000,0	1,0	2000,0
Н-Т, Красноуральское участковое лесничество Красноуральский участок	1370,0	1316,7	3655,4	15000,0	10000,0	2000,0
Н-Т, Петрокаменское участковое лесничество Петрокаменский участок	1046,5	1005,9	2792,5	12000,0	10000,0	7000,0
Н-Т, Петрокаменское участковое лесничество Урочище АОЗТ "Краснополье"	3356,5	3226,1	8956,1	12000,0	10000,0	7000,0
Н-Т, Уральское участковое лесничество Уральский участок	4561,8	4384,5	12172,0	12000,0	10000,0	3000,0
Н-Т, Уральское участковое лесничество Урочище ГУСП Совхоз "Горноуральский"	1112,4	1069,2	2968,3	3000,0	1,0	3000,0
Н-Т, Уральское участковое лесничество урочище ФГУП "Химический завод "Планта"	258,1	248,0	688,6	1000,0	1,0	3000,0
Н-Т, Башкарское участковое лесничество урочище ГЗЗ "Урочище Южаковское"	718,2	690,3	1916,3	21000,0	10000,0	6000,0
Н-Т, Башкарское участковое лесничество АКФС "Дружба" урочище	571,0	548,9	1523,7	2000,0	10000,0	6000,0
Н-Т, Башкарское участковое лесничество Башкарский участок	573,2	551,0	1529,6	16000,0	10000,0	6000,0
Н-Т, Серебрянское участковое лесничество Серебрянский участок	4238,4	4073,6	11309,1	17000,0	10000,0	5000,0
Н-Т, Серебрянское участковое лесничество Чусовской участок	2010,7	1932,6	5365,2	10000,0	10000,0	5000,0
Н-Т, Серебрянское участковое лесничество урочище ГЗЗ "Чусовское"	605,1	581,6	1614,5	500,0	1,0	5000,0
Н-Т, Синегорское участковое лесничество Синегорский участок	4674,9	4493,2	12473,8	8000,0	10000,0	4000,0
Н-Т, Николо-Павловское участковое лесничество урочище СПК "Николо-Павловское"	396,4	381,0	1057,8	2000,0	1,0	7000,0
Н-Т, Николо-Павловское участковое лесничество "Николо-Павловский участок"	737,4	708,8	1967,6	5000,0	10000,0	7000,0
Н-Т, Городское участковое лесничество Городской участок	1436,9	1381,1	3834,2	4000,0	1,0	8000,0
Куш, Красноуральское участковое лесничество Красноуральский участок	429,5	348,1	1019,4	9000,0	1,0	11000,0
Куш, Салдинское участковое лесничество Салдинский участок	274,8	222,7	652,1	9000,0	10000,0	12000,0
Куш, Нижне-Салдинское участковое лесничество Нижнесалдинский участок	1514,6	1227,4	3594,5	6000,0	10000,0	13000,0
Н-л, Коноплинское участковое лесничество Сухогорский участок	5306,3	4445,6	12408,9	12000,0	10000,0	21000,0
Н-л, Павдинское участковое лесничество Павдинский участок	8150,0	6828,0	19059,1	10000,0	10000,0	22000,0
Н-л, Павдинское участковое лесничество Каменский участок	3260,2	2731,4	7624,2	20000,0	10000,0	22000,0
Н-л, Отвинское участковое лесничество Новоселовский участок	16942,8	14194,6	39621,4	5000,0	10000,0	23000,0
Н-л, Старолялинское участковое лесничество Старолялинский участок	28694,2	24039,9	67102,5	23000,0	10000,0	24000,0
Егор, Артемовское участковое лесничество урочище АОЗТ "Согра"	864,4	740,4	2564,1	500,0	1,0	40000,0
Егор, Лебедкинское участковое лесничество Лебедкинский участок	560,6	480,2	1662,8	5000,0	1,0	41000,0
Егор, Красногвардейское участковое лесничество Красногвардейский участок	3439,2	2946,0	10202,0	16000,0	10000,0	41000,0
Верх, Косолманское участковое лесничество Вологинский участок	3374,1	2515,1	6268,2	9000,0	10000,0	25000,0
Верх, Косолманское участковое лесничество Косолманский участок	3286,8	2450,0	6106,1	10000,0	10000,0	25000,0

Рис. 1. Копия экрана фрагмента исходных данных практической кластеризации лесных участков и промышленных площадок

Fig. 1. A fragment print screen of the initial data of forest plots practical clustering and industrial sites

Результаты кластеризации представлены на рис 2. По итогам решения выделены кластеры с лесными участками, в следующем составе (фрагмент выделенных кластеров представлен ниже):

первый: 1) Карпинское лесничество, Кытлымское участковое лесничество, Тыпыльский участок; 2) Новолялинское лесничество, Старолялинское участковое лесничество, Старолялинский участок;

второй: Новолялинское лесничество, Отвинское участковое лесничество, Новоселовский участок;

третий: 1) Егоршинское лесничество, Лебедкинское участковое лесничество, Лебедкинский участок; 2) Егоршинское лесничество, Артемовское участковое лесничество урочище АОЗТ «Согра»;

третий (а): Егоршинское лесничество, Красногвардейское участковое лесничество. Красногвардейский участок;

третий (б): 1) Верхотурское лесничество, Нижнетуринское участковое лесничество, Исковский участок; 2) Верхотурское лесничество, Нижнетуринское участковое лесничество, Нижнетуринский участок; 3) Верхотурское лесничество,

Ступинское участковое лесничество Ступинский участок; 4) Новолялинское лесничество, Павдинское участковое лесничество, Каменский участок; *четвертый:* 1) Карпинское лесничество, Краснотурьинское участковое лесничество, Краснотурьинский участок; 2) Карпинское лесничество, Краснотурьинское участковое лесничество, Воронцовский участок;

четвертый (а): 1) Верхотурское лесничество, Косолманское участковое лесничество, Косолманский участок; 2) Верхотурское лесничество, Косолманское участковое лесничество, Вологинский участок;

четвертый (б): 1) Верхотурское лесничество, Прокоп-Салдинское участ. лесничество, Прокоп-Салдинский участок; 2) Новолялинское лесничество, Павдинское участковое лесничество, Павдинский участок; 3) Новолялинское лесничество, Коноплинское участковое лесничество, Сухогорский участок и т. д. (подробно см. в работах [16, 22]).

Согласно проведенному предварительному анализу результатов (см. рис. 2), можно выделить второй и третий (а) кластеры, представленные отдельными единичными объектами, а также на

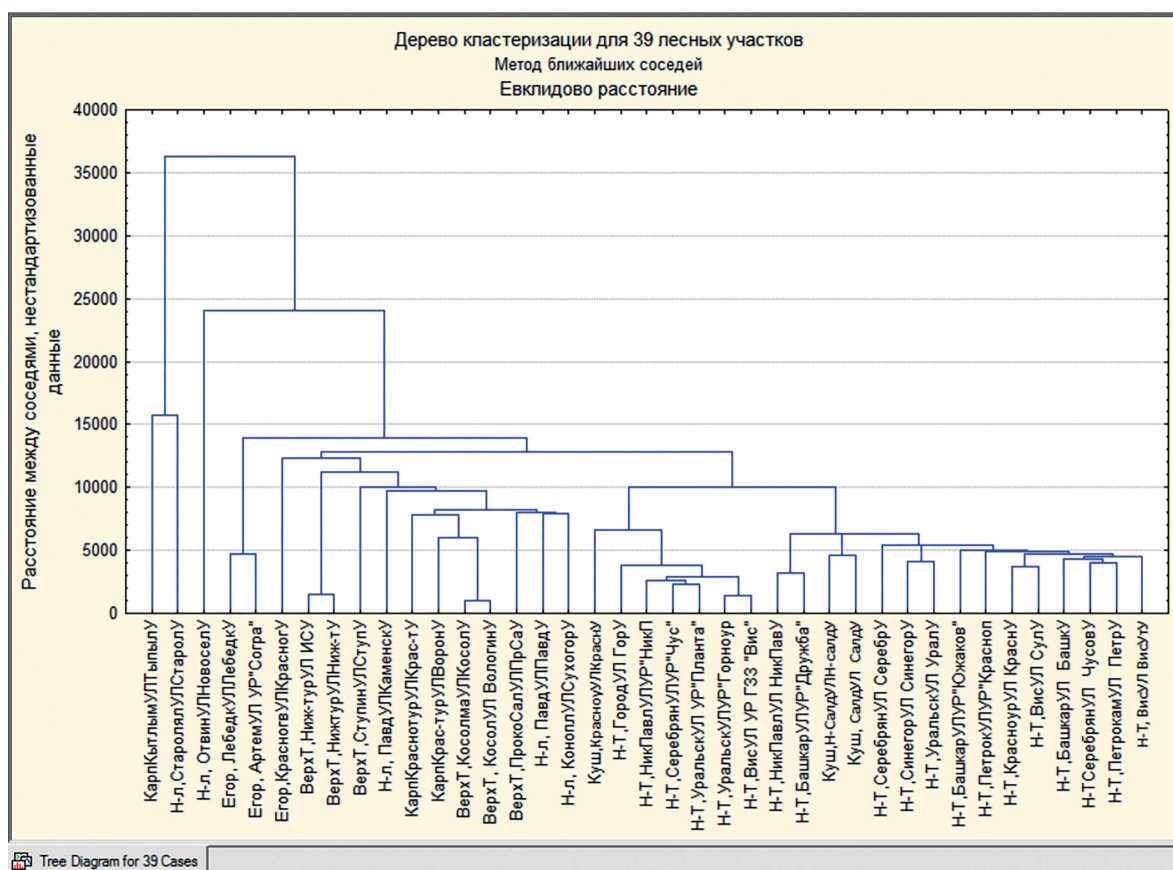


Рис. 2. Дерево кластеризации и графическое представления кластеров для 39 арендованных лесных участков ООО «Синергия»

Fig. 2. Clustering tree and graphical representation of clusters for 39 leased forest plots of Synergy LLC

кластеры 5а, 6в, имеющие в своем составе максимальное число участков. Если по кластеру 5а максимальное число участков обусловлено наличием дороги с твердым покрытием на расстоянии не более 3000 м от условного центра, что определяет возможность транспорта круглых лесоматериалов форвардерами до места переработки, то по кластеру 6в требуется более детальный анализ с полным расчетом характеристик лесных участков этого кластера. Однако на основе предварительного анализа достаточно однозначно определены кластеры:

– *кластер 1:* 1) Карпинское лесничество, Кытлымское участковое лесничество, Тыпыльский участок; 2) Новолялинское лесничество, Старолялинское участковое лесничество, Старолялинский участок;

– *кластер 2:* Новолялинское лесничество, Отвинское участковое лесничество, Новоселовский участок;

– *кластер 4:* 1) Карпинское лесничество, Краснотурьинское участковое лесничество, Краснотурьинский участок; 2) Карпинское лесничество, Краснотурьинское участковое лесничество, Воронцовский участок.

По перечисленным кластерам и соответствующим им лесным участкам формулируются выводы в рамках промежуточного этапа. Оставшиеся семь кластеров требуют дополнительного анализа с расчетами описательных статистик (средних значений, минимального и максимального расстояния, дисперсии и пр.).

На основе предварительного вывода следует необходимость дополнительного, более основательного, анализа на основе метода *K*-средних в целях получения статистических оценок, выделенных 14 кластеров. Результаты кластеризации методом *K*-средних представлены на рис. 3.

Анализ значений средних по рис. 3 показал, что наибольший разброс значений по всем 14 кластерам имеют объемы дровяной древесины, включая балансы лиственные, расстояния из условных центров лесных участков до действующей дороги с твердым покрытием, смежность лесных участков (наличие общих границ), а также географическое размещение лесных участков и объемы заготавливаемой древесины в целом по каждому из участков.

По итогам кластерного анализа, включая заключение по анализу методом *K*-средних, и объ-

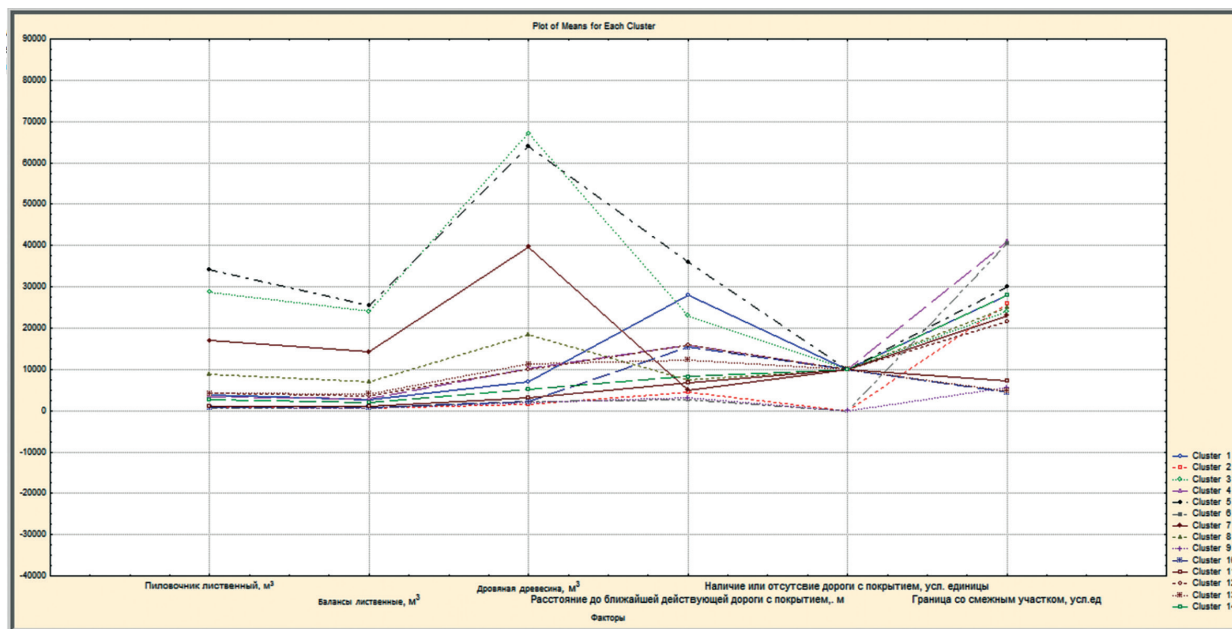


Рис. 3. Графическое отображение кластеров по средним значениям факторов (по оси ординат значения факторов в единицах, приведенных в названиях факторов на оси абсцисс)
Fig. 3. Graphical representation of clusters by the average values of factors (on the ordinate axis, the values of factors in units given in the names of factors on the abscissa axis)

единения множеств факторов лесных участков по лесничествам и дорог с промышленными площадками по переработке круглых лесоматериалов на щепу определено следующее (приведем фрагмент анализа):

достаточно однозначно определены кластеры:

– кластер 1: 1) Карпинское лесничество, Кытлымское участковое лесничество, Тыпыльский участок; 2) Новолялинское лесничество, Старолялинское участковое лесничество, Старолялинский участок;

– кластер 2: Новолялинское лесничество, Отвинское участковое лесничество, Новоселовский участок.

– кластер 4: 1) Карпинское лесничество, Краснотурьинское участковое лесничество, Краснотурьинский участок; 2) Карпинское лесничество, Краснотурьинское участковое лесничество, Воронцовский участок.

По перечисленным кластерам и соответствующим им лесным участкам сформулированы следующие выводы в рамках промежуточного этапа.

Кластер 1 (Карпинское лесничество, Кытлымское участковое лесничество, Тыпыльский участок; Новолялинское лесничество, Старолялинское участковое лесничество, Старолялинский участок): требуется проектирование и строительство лесовозных дорог (магистралей, веток и усов), а также обустройство промышленных площадок.

Кластер 2 (Новолялинское лесничество, Отвинское участковое лесничество, Новоселовский

участок) требуется проектирование и строительство лесовозных дорог (возможно, только усов с организацией двухступенчатой вывозки), а также обустройство промышленных площадок.

Кластер 3 (Егоршинское лесничество, Лебединское участковое лесничество, Лебединский участок; Егоршинское лесничество, Артемовское участковое лесничество, урочище АОЗТ «Согра») целесообразно строительство лесовозных усов с вывозкой круглыми лесоматериалами к площадке, совмещенной с промышленной площадкой для кластера третий (а), примыкающей к железной или автомобильной дороге. На промышленной площадке рекомендуется вести переработку низкокачественной древесины на щепу с вывозкой сменными прицепами щеповозов.

По третьему (а) (Егоршинское лесничество, Красногвардейское участковое лесничество, Красногвардейский участок) рекомендуется строительство лесовозных усов с вывозкой круглыми лесоматериалами к площадке, примыкающей к железной или автомобильной дороге с обустройством площадки для кластера третий (а) и использованием сменных прицепов щеповозов.

По третьему (б) (Верхотурское лесничество, Нижнетуринское участковое лесничество, Исковский участок; Верхотурское лесничество, Нижнетуринское участковое лесничество, Нижнетуринский участок) рекомендуется использование существующих транспортных путей и площадок в местах разгрузки круглых лесоматериалов в Нижней или Новой Туре, а также обустройство

двух площадок, строительство лесовозных усов, возможно, использование сменных прицепов щеповозов. Для Ступинского участка Верхотурского лесничества, Ступинского участкового лесничества рекомендуется строительство лесовозных усов с вывозкой круглыми лесоматериалами (часть) к площадке в Новоселовском участке Ново-Лялинского лесничества. Возможна прямая вывозка (часть) в Верхотурье на промышленную площадку, однако в этом случае необходимо строительство л/в магистрали и веток. Для этого же кластера, но Каменского участка, Новолялинского лесничества, Павдинского участкового лесничества рекомендуется проектирование и строительство лесовозных дорог (возможно, только усов с организацией двухступенчатой вывозки), а также вывозка первой ступенью на промышленные площадки, часть на площадку Кытлымского участка, часть Павдинского (детально см. в работах [16, 22]).

Приведенный фрагмент заключения по результатам кластерного анализа характеризует возможность адекватного применения этого подхода, определяет множество локальных обрабатывающих транспортно-перегрузочных недвижимых объектов, включая промышленные площадки как производное от множеств лесных участков при заданном множестве системы машин.

По остальным кластерам следуют аналогичные конкретизированные заключения о координатах размещения промышленных площадок, строительстве или нецелесообразности строительства дорог с использованием существующей инфраструктуры и отгрузкой продукции с площадок без двухступенчатой вывозки.

Выводы

Известные подходы к типизации объектов лесного комплекса характеризуются отсутствием локальных обрабатывающих транспортно-перегрузочных множеств недвижимых объектов в виде лесных дорог, промышленных площадок и других объектов, размещаемых на арендуемых лесных участках, для выполнения транспортных, погрузочно-разгрузочных, обрабатывающих и информационных функций. В связи с отсутствием данных множеств конечный результат типизации ограничивает системность и оптимизацию систем лесного комплекса.

Системное описание в полной мере обеспечивается разработанной модифицированной методикой, которая отличается от известных методик созданием, включением и объединением локальных обрабатывающих транспортно-перегрузочных множеств недвижимых объектов, а также параметрически заданными системой лесных машин и множествами лесных участков. Локальные обрабатывающие транспортно-перегрузочные

множества недвижимых объектов лесного комплекса рассматриваются, как производное множество (множество пересечения) от множеств лесных участков при заданном множестве системы машин.

Практическая значимость разработанной методики и ее практическое приложение к условиям инвестпроекта и арендованных лесных участков ООО «Синергия» заключаются в получении конечного результата в виде рекомендаций по рациональным множествам лесных дорог, оптимально размещенным промышленным площадкам и другим объектам для транспортных, погрузочно-разгрузочных, обрабатывающих и информационных функций, реализуемых на арендуемых лесных участках.

Список литературы

- [1] Обыденников В.И., Кожухов Н.И., Коротков С.А. Актуальные проблемы отечественной лесной типологии // Лесной вестник / Forestry Bulletin. 2019. Т. 23, № 2. с. 5–11. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-2-5-11
- [2] Сукачев В.Н. Избранные труды. Т. I. Л.: Наука, 1972. 420 с.
- [3] Мелехов И.С. Лесоведение. М.: Лесная пром-сть, 1980. 497 с.
- [4] Барановский В.А., Некрасов Р.М. Системы машин для лесозаготовок/ В.А. Барановский. М.: Лесная пром-сть, 1977. 248 с.
- [5] Захариков В.М. Определение эффективных систем машин лесосечных работ на расчетных и оптимизационных моделях // Сб. науч. трудов Московского лесотехнического института, 1981. № 118. С. 5–8.
- [6] Типизация природно-производственных условий лесозаготовительных районов: рекомендации. Химки: Изд-во ЦНИИМЭ, 1986. 23 с.
- [7] Якимович С.Б., Тетерина М.А. Выбор систем заготовки древесины в условиях неопределенности // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2008. № 185. С. 263–268.
- [8] Якимович С.Б., Тетерина М.А. Синхронизация обрабатывающе-транспортных систем заготовки и первичной обработки древесины: монография. Йошкар-Ола: Изд-во Марийского государственного технического университета, 2011. 201 с.
- [9] Рябухин П.Б., Казаков Н.В., Бурлов А.Н. Метод лесопромышленной типизации лесосек по природно-производственным условиям на примере ельников Дальневосточного федерального округа // Системы. Методы. Технологии, 2010. № 2(6). С. 52–57.
- [10] Казаков Н.В., Рябухин П.Б., Садетдинов М.А. Метод типизации лесного фонда // Вестник Красноярского государственного аграрного университета, 2013. № 10. С. 157–161.
- [11] Якимович С.Б., Ефимов Ю.В. Оценка эффективности систем машин и харвестерных агрегатов для заготовки древесины по фундаментальному критерию технолога — удельной энергоемкости // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 1. С. 59–68. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-1-59-68
- [12] Шегельман И.Р., Будник П.В. Типизация лесных территорий по природно-производственным условиям на основе кластерного анализа // ИзВУЗ Лесной журнал, 2021. № 1. С. 120–137. DOI: 10.17238/issn0536-1036

- [13] Шегельман И.Р., Будник П.В., Баклагин В.Н. Минимизация техногенного воздействия лесных машин на экосистемы лесов на основе кластеризации природно-производственных условий лесозаготовок // Успехи современного естествознания, 2018. № 11 (ч. 1). С. 72–78. DOI: 10.17513/use.36908
- [14] Якимович С.Б. Методика типизации и выделения однородных совмещенных множеств объектов лесного комплекса / RusForest 2022: I Ежегодная междунар. науч.-практ. конф. «Устойчивое и инновационное развитие лесопромышленного комплекса», Екатеринбург, 03–04 февраля 2022. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2022. URL: <https://disk.yandex.ru/d/gDEnugXlzCWmJw>
- [15] Постановление Правительства Российской Федерации от 06.12.2021 № 2214. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/000120211210000>.
- [16] Обоснование технологических процессов переработки низкосортных круглых лесоматериалов, не подлежащих переработке на фанеру и экспортные пиломатериалы на предприятиях ООО «Синергия»: Отчет о НИР (Договор № Н-74/2021 от 22.10.2021 года). Екатеринбург: Изд-во Уральского государственного лесотехнического университета, 2021. 130 с.
- [17] Влияние природных и антропогенных факторов на лесные экосистемы и пути минимизации отрицательного воздействия техногенеза : отчет о НИР (промежуточный): FEUG-2020-0013 Экологические аспекты рационального природопользования. Екатеринбург: Изд-во Уральского государственного лесотехнического университета, 2020. 130 с.
- [18] Ким Дж.-О., Мьюллер Ч.У., Клекка У.Р. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ. М.: Финансы и статистика, 1989. 215 с.
- [19] Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 165 с.
- [20] Боровиков В.П. STATISTICA: искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов. СПб.: Питер, 2001. 656 с.
- [21] ООО «Синергия», «Создание высокотехнологичного деревообрабатывающего производства на территории Свердловской области». Екатеринбург: 2022. URL: <https://mpr.midural.ru/deyatelnost/investprojects/investproekty/siner-gia.php>
- [22] Лесохозяйственные регламенты 31 лесничества Свердловской области, утвержденные приказом Министерства природных ресурсов и экологии Свердловской области от 10.12.2020 № 1720 «О внесении изменений в Лесохозяйственные регламенты лесничеств Свердловской области». Екатеринбург, 2022. URL: <https://mprso.midural.ru/article/show/id/10187>
- [23] Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1980. 976 с.
- [24] Боровиков В.П. Программа STATISTICA для студентов и инженеров. М.: КомпьютерПресс, 2001. 299 с.
- [25] Кириллов В.И. Квалиметрия и системный анализ. М.: ИНФРА-М, Новое знание, 2011. 440 с.

Сведения об авторах

Якимович Сергей Борисович✉ — д-р техн. наук, профессор кафедры технологии и оборудования лесопромышленного производства ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», yakimovichsb@m.usfeu.ru

Мехренцев Андрей Вениаминович — канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», mehrentsevav@m.usfeu.ru

Поступила в редакцию 14.11.2022.

Одобрено после рецензирования 28.11.2022.

Принята к публикации 21.03.2023.

FACTOR SETS TYPIFICATION OF FOREST COMPLEX OBJECTS AND PRE-PROJECT PLACEMENT JUSTIFICATION

S.B. Yakimovich✉, A.V. Mehrentsev

Ural State Forestry University, 37, Sibirskiy trakt st., 620100, Ekaterinburg, Russia

yakimovichsb@m.usfeu.ru

The article provides a critical analysis of well-known works on the typification in the forest complex and the allocation of homogeneous sets based on cluster analysis. The typification of natural production conditions and parametrically known system of forest machines on the one hand and the absence of a derived set of real objects such as forest roads, industrial facility sites and other objects located on leased forest plots on the other hand is formulated. The efficiency of wood harvesting is determined on the basis of modifying the methodology of rational unification (intersection) and typification of sets of natural production conditions in forest areas, a well-known system of machines for harvesting and transporting timber, as well as recommendations for a rational set of forest roads, industrial sites and other objects for transport, loading and unloading, processing and information functions implemented on leased forest plots. Modification and practical industrial approbation of the technique, which differs from the well-known ones by including local processing transport and transshipment sets of local objects of the forest complex, a parametrically specified system of forest machines, as well as sets of forest plots, are carried out. The final result was obtained in the form of recommendations on rational sets of forest roads, the placement of industrial sites and other objects for transport, loading and unloading and processing functions implemented on leased forest plots.

Keywords: forest areas, derived set of local objects, natural production conditions, clustering

Suggested citation: Yakimovich S.B., Mehrentsev A.V. *Tipizatsiya faktornykh mnozhestv ob'ektov lesnogo kompleksa i predproektnoe obosnovanie ikh razmeshcheniya* [Factor sets typification of forest complex objects and pre-project placement justification]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 6, pp. 114–125. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-114-125

References

- [1] Obydyonnikov V.I., Kozhukhov N.I., Korotkov S.A. *Aktual'nye problemy otechestvennoy lesnoy tipologii* [Domestic forest typology current issues]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 2, pp. 5–11. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-2-5-11
- [2] Sukachev V.N. *Izbrannye trudy* [Selected Works]. Leningrad: Nauka, 1972, 420 p.
- [3] Melekhov I.S. *Lesovedenie* [Forest Science]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest industry], 1980, 497 p.
- [4] Baranovsky V.A., Nekrasov R.M. *Sistemy mashin dlja lesozagotovok* [Systems of machines for logging]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest industry], 1977, 248 p.
- [5] Zakharikov, V.M. *Opreделение эффективных систем машин лесосечных работ на расчетных и оптимизационных моделях* [Determination of effective systems of cutting machines on even and optimization models]. *Sb. nauchn. tr. Moskovskogo lesotekhnicheskogo instituta* [Collection of scientific tr. of the Moscow Forestry Institute], 1981, no. 118, pp. 5–8.
- [6] *Tipizatsiya prirodno-proizvodstvennykh usloviy lesozagotovitel'nykh rayonov: rekomendatsii* [Typification of natural production conditions of logging areas: recommendations]. Khimki: TSNIIME, 1986, 23 p.
- [7] Yakimovich S.B., Teterina M.A. *Vybor sistem zagotovki drevesiny v usloviyakh neopredelennosti* [The choice of wood harvesting systems in conditions of uncertainty]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy], 2008, no. 185, pp. 263–268.
- [8] Yakimovich S.B., Teterina M.A. *Sinkhronizatsiya obrabatyvayushche-transportnykh sistem zagotovki i pervichnoy obrabotki drevesiny: monografiya*. [Synchronization of processing and transport systems of harvesting and primary processing of wood: monograph]. Yoshkar-Ola: Mariyskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2011, 201 p.
- [9] Ryabukhin P.B., Kazakov N.V., Burlov A.N. *Metod lesopromyshlennoy tipizatsii lesosek po prirodno-proizvodstvennykh usloviyam na primere el'nikov Dal'nevostochnogo federal'nogo okruga* [Method of timber industry typification of cutting areas according to natural production conditions on the example of spruce forests of the Far Eastern Federal District]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [The system. Methods. Technologies], 2010, no. 2(6), pp. 52–57.
- [10] Kazakov N.V., Ryabukhin P.B., Sadetdinov M.A. *Metod tipizatsii lesnogo fonda* [Method of forest fund typification]. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University], 2013, no. 10, pp. 157–161.
- [11] Yakimovich S.B., Efimov Yu.V. *Otsenka effektivnosti sistem mashin i kharvesternykh agregatov dlya zagotovki drevesiny po fundamental'nomu kriteriyu tekhnologa — udel'noy energoemkosti* [Estimation of machinery and harvesting heads efficiency systems for preparation of wood by fundamental criteria technology — special storage density]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 1, pp. 59–68. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-1-59-68
- [12] Shegelman I.R., Budnik P.V. *Tipizatsiya lesnykh territoriy po prirodno-proizvodstvennykh usloviyam na osnove klasterного analiza* [Typification of forest territories by natural production conditions based on cluster analysis]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2021, no. 1, pp. 120–137. DOI: 10.17238/issn0536-1036
- [13] Shegelman I.R., Budnik P.V., Baklagin V.N. *Minimizatsiya tekhnogenogo vozdeystviya lesnykh mashin na ekosistemy lesov na osnove klasterizatsii prirodno-proizvodstvennykh usloviy lesozagotovok* [Minimization of technogenic impact of forest machines on forest ecosystems based on clustering of natural production conditions of logging]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Successes of modern natural science], 2018, no. 11(part 1), pp. 72–78. DOI: 10.17513/use.36908

- [14] Yakimovich S.B. *Metodika tipizatsii i vydeleniya odnorodnykh sovmeshchennykh mnozhestv ob'ektov lesnogo kompleksa* [Method of typification and allocation of homogeneous combined sets of objects of the forest complex]. RusForest 2022: I Ezhegodnaya mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Ustoychivoe i innovatsionnoe razvitiye lesopromyshlennogo kompleksa» [I Annual International scientific and Practical Conference «Sustainable and innovative development of the agricultural complex»]. Yekaterinburg: UGLTU, 2022. Available at: <https://disk.yandex.ru/d/gDENugXlzCWmJw> (accessed 15.09.2022).
- [15] *Postanovlenie Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 06.12.2021 № 2214* [Decree of the Government of the Russian Federation No. 2214 dated 06.12.2021. Official publication of legal acts], 2021. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/000120211210000> (accessed 15.09.2022).
- [16] *Obosnovanie tekhnologicheskikh protsessov pererabotki nizkosortnykh kruglykh lesoma-terialov, ne podlezhashchikh pererabotke na faneru i eksportnye pilomaterialy na predpri-yatiyakh OOO «Sinergiya»: Otchet o NIR (Dogovor № N-74/2021 ot 22.10.2021 goda)* [Substantiation of technological processes for processing low-grade round timber that cannot be processed into plywood and export lumber at the enterprises of Synergy LLC: Research report (Contract No. N-74/2021 dated 10.22.2021)]. Yekaterinburg: Ural State Forestry University, 2021, 130 p.
- [17] *Vliyaniye prirodnykh i antropogennykh faktorov na lesnye ekosistemy i puti minimizatsii otritsatel'nogo vozdeystviya tekhnogenezha: otchet o NIR (promezhutochnyy): FEUG-2020-0013* *Ekologicheskie aspekty ratsional'nogo prirodopol'zovaniya* [The influence of natural and anthropogenic factors on forest ecosystems and ways to minimize the negative impact of technogenesis : research report (interim): FEUG-2020-0013 Ecological aspects of rational nature management]. Yekaterinburg: Ural State Forestry University, 2020, 130 p.
- [18] Kim J.-O., Muller C.W., Klekka W.R. *Faktornyy, diskriminantnyy i klasternyy analiz* [Factorial, discriminant and cluster analysis]. Moscow: Finance and Statistics, 1989, 215 p.
- [19] Zadeh L.A. *Ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ego primeneniye k prinyatiyu priblizhennykh resheniy* [The concept of a linguistic variable and its application to making immediate decisions]. Moscow: Mir, 1976, 165 p.
- [20] Borovikov V.P. *STATISTICA: iskusstvo analiza dannykh na komp'yutere. Dlya professionalov* [STATISTICA: the art of data analysis on a computer. For professionals]. St. Petersburg: Peter, 2001, 656 p.
- [21] OOO «Sinergiya», «Sozdanie vysokotekhnologichnogo derevoobrabatyvayushchego proizvodstva na territorii Sverdlovskoy oblasti» [Synergy LLC, «Creation of high-tech woodworking production in the territory of the Sverdlovsk region». Yekaterinburg, 2022. Available at: <https://mpr.midural.ru/deyatelnost/investprojects/investproekty/siner-gia.php> (accessed 15.09.2022).
- [22] *Lesokhozyaystvennye reglamenti 31 lesnichestva sverdlovskoy oblasti, utverzhdennye prikazom Ministerstva prirodnykh resursov i ekologiyi Sverdlovskoy oblasti ot 10.12.2020 № 1720 «O vnesenii izmeneniy v Lesokhozyaystvennye reglamenti lesnichestv Sverdlovskoy oblasti»* [Forestry regulations of the 31 forestry districts of the sverdlovsk region, approved by the Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Sverdlovsk Region dated 10.12.2020 No. 1720 «On Amendments to the Forestry Regulations of the Forestry districts of the Sverdlovsk Region»]. Yekaterinburg, 2022. Available at: <https://mprso.midural.ru/article/show/id/10187> (accessed 15.09.2022).
- [23] Bronstein I.N., Semendyaev K.A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov* [Handbook of mathematics for engineers and students of higher education institutions]. Moscow: Nauka [Science], 1980, 976 p.
- [24] Borovikov V.P. *Programma STATISTICA dlya studentov i inzhenerov* [Program STATISTICA for students and engineers]. Moscow: ComputerPress, 2001, 299 p.
- [25] Kirillov V.I. *Kvalimetriya i sistemnyy analiz* [Qualimetry and system analysis]. Moscow: INFRA-M, Novoe znanie [New Knowledge], 2011, 440 p.

Authors' information

Yakimovich Sergey Borisovich ✉ — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Department of Technology and Equipment of Forestry Production of the Ural State Forestry University, yakimovichsb@m.usfeu.ru

Mehrentsev Andrey Veniaminovich — Cand. Sci. (Tech.), Head of the Department of Technology and Equipment of Forestry Production of the Ural State Forestry University, mehrentsevav@m.usfeu.ru

Received 14.11.2022.

Approved after review 28.11.2022.

Accepted for publication 21.03.2023.

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

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНЫХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ ЛЕСОВОЗНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

А.Н. Брюховецкий¹, А.В. Скрыпников¹, Д.Г. Козлов^{2✉},
П.В. Романов¹, П.А. Бойков¹, М.Н. Казачек³

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», Россия, 394036, г. Воронеж, пр-т Революции, д. 19

²ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, 394087, г. Воронеж, ул. Мичурина, д. 1

³ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Россия, 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 8

dimvsau@mail.ru

Представлен анализ расчетных схем исследования тепловлажностных свойств грунтов лесовозных автомобильных дорог. Показаны их достоинства и недостатки. Предложен рациональный метод определения тепловлажностных свойств данных грунтов. Выявлены все факторы учитываемые при их анализе. Проведено математическое моделирование и определена целевая функция, являющаяся основной частью математической модели со всеми элементами и связями. С помощью математической модели установлены важнейшие тепловлажностные характеристики, позволяющие получить необходимые значения коэффициентов системы, по которым можно рассчитать поля влажности и температуры для технологического или эксплуатационного тепломассообмена при строительстве лесовозных автомобильных дорог. Разработана структурная схема исследования тепловлажностных свойств, указанных грунтов для моделирования тепломассообмена.

Ключевые слова: свойства грунтов, тепловлажностные свойства грунта, тепловой поток, температуропроводность грунтов, лесные автомобильные дороги

Ссылка для цитирования: Брюховецкий А.Н., Скрыпников А.В., Козлов Д.Г., Романов П.В., Бойков П.А., Казачек М.Н. Структурная схема исследования тепловлажностных свойств грунтов лесовозных автомобильных дорог // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 6. С. 126–138.
DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-126-138

Основным элементом лесовозной автомобильной дороги служит земляное полотно. В зависимости от показателей его устойчивости, прочности и долговечности зависит работоспособность дорожных одежд и всей конструкции дороги вместе с дорожным покрытием.

Воздействие на дорожное покрытие со стороны нижележащих почвенных слоев, вызываемое нарушениями их водно-теплового режима, приводит к разрушению всей дорожной одежды. Для повышения ее долговечности и прочности важно составить прогноз влажности грунта в основании земляного полотна [1–4].

Применение разработанных методов определения тепловлажностных свойств (ТВС) грунтов в полевых условиях довольно затруднительно, поскольку сопряжено со сложными и трудоемкими исследованиями и значительными погрешностями измерений [5]. Для экспериментального определения ТВС грунтов на образцах широко используется арсенал физических преобразователей тепловых и влажностных процессов в электрические многопараметрические сигналы, поэтому большой интерес представляет исследо-

вание ТВС грунтов земляного полотна на образцах в лабораторных условиях [6–10].

Цель работы

Цель работы — разработка математического обоснования и структурной схемы исследования ТВС грунтов лесовозных автомобильных дорог для определения важнейших тепловых и влажностных характеристик, влияющих на технологический или эксплуатационный тепломассообмен при строительстве лесовозных автомобильных дорог.

Методика исследования

На основе анализа системы тепломассообменных процессов в грунтах земляного полотна [11–13] математическую модель можно представить следующим образом

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \epsilon \frac{\partial W}{\partial t}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = a_1 \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} + a_1 \epsilon_1 \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}, \quad (2)$$

где t — температура, К;

τ — время, с;

a — коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$;

z — переменная координата по глубине, м ;

ϵ — коэффициент теплообмена за счет фазовых превращений влаги, К ;

W — влажность, доли единицы;

a_1 — коэффициент учета влагопроводности;

ϵ_1 — термоградиентный коэффициент, $1/\text{К}$.

Коэффициент a_1 можно представить в виде

$$a_1 = \frac{a_{\text{ж}}}{1 - \epsilon}, \quad (3)$$

где $a_{\text{ж}}$ — влажностный коэффициент ТМО;

ϵ — критерий фазового превращения при конденсации водяного пара в жидкую фазу.

Термоградиентный коэффициент b_1 можно записать в виде

$$b_1 = \frac{\delta W}{\delta t}. \quad (4)$$

Коэффициент теплообмена за счет фазовых превращений для талых грунтов выражается следующим образом

$$b = \frac{\epsilon \rho_n}{c}, \quad (5)$$

где ρ_n — скрытая теплота парообразования, $\text{Дж}/\text{кг}$;

c — удельная теплоемкость талого грунта, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

Уравнения (1) и (2) описывают законы миграции тепла и влаги в земляном полотне дороги. В них входят коэффициенты a , a_1 , b , b_1 , характеризующие теплообменные процессы.

Эти свойства грунтов можно определить при ненарушенной структуре. Как показывает анализ литературных источников, проведение исследований тепловлажностных свойств грунтов в полевых условиях сопряжено с выполнением трудоемких процессов. Применяемые в исследованиях ТВС экспресс-методы дают значительные погрешности при измерениях. Наиболее рациональным в этом случае, является экспериментальное определение ТВС грунтов на образцах, которое в свою очередь позволяет широко использовать физические преобразования тепловых и влажностных процессов в электрические многопараметрические сигналы. Поэтому наибольший интерес в настоящее время представляет исследование ТВС грунтов полотна на образцах в лабораторных условиях [14–18, 22–25].

При исследовании ТВС на образцах на основе выражений (1) и (2) необходимо обосновать условия однозначности, позволяющие в наибольшей мере моделировать теплообмен в грунтах. Для этой цели необходимо обосновать форму и свойства образцов, а также начальные и краевые условия теплообмена.

В теории и практике исследований ТВС грунтов обычно применяют образцы в виде пластины и стержней. Для таких форм образцов известно наибольшее количество расчетных схем и аналитических решений. Особенно это имеет место в теории теплообмена. Выбор формы пластины и стержня зависит прежде всего от гарантированной направленности тепло- и влагодиффузии в исследуемом теле, т.е. создаваемой направленности градиентов [5, 9, 19–21].

Если вдоль образца закон распределения тепла и влаги является однородным, линейным, то образец рекомендуется брать в виде пластины, что сокращает время испытания и повышает достоверность полученных результатов. Если же вдоль образца устанавливается нелинейное поле, то целесообразно применять образец в виде стержня.

При исследованиях образцов методом математического моделирования с применением выражений (1) и (2) следует задать ТВС грунтов с линейными или нелинейными законами их изменения вдоль образца. В практике исследования капиллярно-пористых тел образцы используют, как правило, из однородных материалов.

Начальные и краевые условия при исследованиях принимаются различными, в зависимости от расчетных схем и условий стабилизации температуры, тепловых потоков и влажности на краях образцов.

Рассмотрим следующие расчетные схемы.

Схема 1. Комплексный теплообмен в образце (уравнения (1) и (2)). Эта схема является наиболее общей. Влажность образцов находится в пределах $W_{\text{мг}} < W < W_{\text{пв}}$, температура $t_{\text{л}} < t < t_{\text{б}}$, где $W_{\text{мг}}$ — мгновенное значение влажности грунта в точке отбора пробы; $W_{\text{пв}}$ — поверхностная влажность грунта; $t_{\text{л}}$ — линейная температура грунта; $t_{\text{б}}$ — максимальная бытовая температура грунта земляного полотна. Проводится одновременный анализ диффузии тепла и миграции влаги, а также их общего влияния друг на друга. Наиболее полно определяется реальный влажностно-температурный режим (ВТР) земляного полотна. Однако исследование ТВС по схеме 1 вызывает большие затруднения.

Схема 1 широко используется при дорожном строительстве в процессе возведения полотна и в различных условиях его эксплуатации. Она применима к анализу влажностно-температурного режима полотна в зимние и летние периоды, при анализе свойств в процессе перемешивания различных грунтов с вяжущими, при уплотнении промерзающих грунтов, при транспортировании грунтов, а также в других случаях.

Схема 2. Теплообмен без массообмена. Применяется при исследовании диффузии тепла с малым влагосодержанием образцов ($W < W_{\text{мг}}$),

при изучении ТВС на пластинах, на образцах из песчаных и обломочных грунтов, а также при изучении свойств слоев одежд из щебня, гравия и других материалов.

Математическая модель для второй расчетной схемы имеет вид

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}. \quad (6)$$

В дорожном строительстве схема 2 применяется при расчетах термообработки грунтов, при замораживании грунтов в процессе проходки водонасыщенных пластов, при перемешивании грунтов малой влажности с вяжущими грунтами.

Схема 3. Массообмен без теплообмена. Предназначена для случаев изучения ТВС при наличии значительных влажностных градиентов при изотермическом влагообмене, при контактировании почвенных слоев различной влажности, а также при быстром и интенсивном их увлажнении.

Математическая модель схемы 3 отмечается коэффициентом пропорциональности m_1 . На противоположном торце образца температура возрастает, но с меньшей интенсивностью — m_2 .

На «горячем» торце вследствие испарения влажность уменьшается с темпом m_3 , а на «холодном» из-за термодиффузии увеличивается с темпом m_4 .

Процесс, обусловленный тепловлагообменом на «горячем» и «холодном» торцах, описывается следующими краевыми условиями:

$$t(z, 0) = t_H; \quad 0 \leq z \leq l; \quad (7)$$

$$t(0, \tau) = t_H + m_1 \tau; \quad m_2 < m_1; \quad (8)$$

$$t(l, \tau) = t_H + m_2 \tau; \quad 0 \leq \tau \leq 3,6 \cdot 10^3 \text{c}; \quad (9)$$

$$W(z, 0) = W_H; \quad m_3 > m_4; \quad (10)$$

$$W(0, \tau) = W_H - m_3 \tau; \quad (11)$$

$$W(l, \tau) = W_H + m_4 \tau. \quad (12)$$

Уравнения (1) и (2) решали при краевых условиях (10). Подставив второе уравнение системы (10) в первое, получаем

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + a_1 b_1 b \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + b a_1 \frac{\partial^2 W}{\partial z^2}; \quad (13)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = a_1 b_1 \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + a_1 \frac{\partial^2 W}{\partial z^2}. \quad (14)$$

Примем новые функции

$$T = t - t_H; \quad W_1 = W - W_H. \quad (15)$$

Вектор переменных и матрица коэффициентов системы уравнений будут иметь следующий вид

$$X = \begin{pmatrix} T \\ W_1 \end{pmatrix}; \quad A = \begin{pmatrix} a + a_1 b_1 b & a_1 b_1 \\ a_1 b_1 & a_1 \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Запишем уравнение (13) в матричном виде

$$\frac{\partial X}{\partial \tau} = A \frac{\partial^2 X}{\partial z^2}; \quad (17)$$

$$X(z, 0) = 0;$$

$$X(0, \tau) = \begin{pmatrix} m_1 \tau \\ -m_3 \tau \end{pmatrix}; \quad X(l, \tau) = \begin{pmatrix} m_2 \tau \\ m_4 \tau \end{pmatrix}. \quad (18)$$

Приведем матрицу A к диагональной матрице S

$$S = BAB^{-1} = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,5 \left[a + a_1 b_1 b + a_1 + \sqrt{(a + a_1 b_1 b + a_1)^2 - 4a_1 a} \right] & \\ 0 & 0,5 \left[a + a_1 b_1 b + a_1 - \sqrt{(a + a_1 b_1 b + a_1)^2 - 4a_1 a} \right] \end{pmatrix}, \quad (19)$$

где λ_1 и λ_2 — собственные значения матрицы A .

$$\lambda_1 = 0,5 \left[a + a_1 b_1 b + a_1 + \sqrt{(a + a_1 b_1 b + a_1)^2 + 4a_1 a} \right] > 0. \quad (20)$$

$$\lambda_2 = 0,5 \left[a + a_1 b_1 b + a_1 - \sqrt{(a + a_1 b_1 b + a_1)^2 - 4a_1 a} \right] > 0. \quad (21)$$

$$B = \begin{pmatrix} \frac{\lambda_1 - a}{\sqrt{(\lambda_1 - a_1)^2 + a_1^2 b^2}} & \frac{\lambda_2 - a}{\sqrt{(\lambda_2 - a_1)^2 + a_1^2 b^2}} \\ \frac{a_1 b}{\sqrt{(\lambda_1 - a_1)^2 + a_1^2 b^2}} & \frac{a_1 b}{\sqrt{(\lambda_2 - a_1)^2 + a_1^2 b^2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{pmatrix}. \quad (22)$$

$$B^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{(\lambda_1 - a_1)^2 + a_1^2 b^2}}{\lambda_1 - \lambda_2} & \frac{(a_1 - \lambda_2) \sqrt{(\lambda_1 - a_1)^2 + a_1^2 b^2}}{(\lambda_1 - \lambda_2) a_1 b} \\ \frac{\sqrt{(\lambda_2 - a_1)^2 + a_1^2 b^2}}{\lambda_1 - \lambda_2} & \frac{(\lambda_1 - a_1) \sqrt{(\lambda_2 - a_1)^2 + a_1^2 b^2}}{(\lambda_1 - \lambda_2) a_1 b} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b'_{11} & b'_{12} \\ b'_{21} & b'_{22} \end{pmatrix}. \quad (23)$$

Введем обозначения:

$$d_1 = \sqrt{(\lambda_1 - a_1)^2 + a_1^2 b^2}; \quad (24)$$

$$d_2 = \sqrt{(\lambda_2 - a_1)^2 + a_1^2 b^2}. \quad (25)$$

Тогда матрицы B и B^{-1} можно записать

$$B = \begin{pmatrix} \frac{\lambda_1 - a_1}{d_1} & \frac{\lambda_2 - a_1}{d_2} \\ \frac{a_1 b_1}{d_1} & \frac{a_1 b}{d_2} \end{pmatrix}; \quad (26)$$

$$B^{-1} = \begin{vmatrix} \frac{d_1}{\lambda_1 - \lambda_2} & \frac{(a_1 - \lambda_2)d_1}{(\lambda_1 - \lambda_2)a_1 b} \\ \frac{d_2}{\lambda_1 - \lambda_2} & \frac{(\lambda_1 - a)d_2}{(\lambda_1 - \lambda_2)a_1 b} \end{vmatrix}. \quad (27)$$

Введем новый вектор $\gamma = BX$.

Тогда уравнение (18) примет вид

$$B \frac{\partial X}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \quad (28)$$

или

$$B \frac{\partial X}{\partial \tau} = BAB^{-1} B \frac{\partial^2 X}{\partial z^2}; \quad (29)$$

при краевых условиях:

$$\gamma(z, 0) = 0; \quad (30)$$

$$\gamma(0, \tau) = B \begin{vmatrix} m_1 \tau \\ -m_3 \tau \end{vmatrix}; \quad (31)$$

$$\gamma(l, \tau) = B \begin{vmatrix} m_2 \tau \\ -m_4 \tau \end{vmatrix}. \quad (32)$$

Решение уравнения (29) при краевых условиях (31) имеет вид

$$\gamma(z, \tau) = \frac{2S\pi}{l^2} \sum_1^\infty n \exp\left[\frac{Sn^2 \pi^2 \tau}{l^2}\right] \sin \frac{\pi n z}{l} \times \int_0^\tau \exp\left[-\frac{Sn^2 \pi^2 \eta}{l^2}\right] [\gamma(0, \tau) - (-1)^n \gamma(l, \tau)] d\eta. \quad (33)$$

Отсюда

$$\gamma(z, \tau) = \frac{2}{\pi} \sum_1^\infty \frac{\sin \frac{\pi n z}{l}}{n} \times \left[\frac{\tau}{S} - \frac{l^2}{S^2 \pi^2 n^2} - \frac{l^2 \exp(-S\pi^2 n^2 (l^2 x \tau))}{S^2 \pi^2 n^2} \right] \cdot B \cdot M, \quad (34)$$

где

$$M = \begin{vmatrix} m_1 - (-1)^n m_2 \\ -m_3 - (-1)^n m_4 \end{vmatrix}. \quad (35)$$

Найдем вектор $X = B^{-1}\gamma$ и составляющие вектора X : температуру t (K) и влажность W (%).

Окончательно выражение для поля температуры в образце с учетом влагообмена примет вид

$$t(z, \tau) = t_n + \frac{2}{\pi} \sum_1^\infty \frac{\sin \frac{\pi n z}{l}}{n(\lambda_1 - \lambda_2)} \times \left[\tau - \frac{l^2}{\pi^2 n^2 \lambda_1} \left(1 + \exp\left(-\frac{\lambda_1 \pi^2 n^2}{l^2} \tau\right) \right) \right] \times$$

$$\times [(\lambda_1 - a_1)(m_1 - (-1)^n m_4)] + \left[\tau - \frac{l^2}{\pi^2 n^2 \lambda_2} \left(1 + \exp\left(-\frac{\lambda_2 \pi^2 n^2}{l^2} \tau\right) \right) \right] \times \left[(a_1 - \lambda_2)(m_1 - (-1)^n m_2) - \frac{(a_1 - \lambda_2)d_1}{d_2} (m_3 + (-1)^n m_4) \right]. \quad (36)$$

Окончательно выражение для поля влажности в образце примет вид

$$W(z, \tau) = W_n + \frac{2}{\pi} \sum_1^\infty \frac{\sin \frac{\pi n z}{l}}{n(\lambda_1 - \lambda_2)} \times \left[\tau - \frac{l^2}{\pi^2 n^2 \lambda_1} \left(1 + \exp\left(-\frac{\lambda_1 \pi^2 n^2}{l^2} \tau\right) \right) \right] \times \left[\frac{d_2(\lambda_1 - a_1)}{d_1(\lambda_1 - \lambda_2)} (m_1 - (-1)^n m_2) - (\lambda_2 - a_1)(m_3 + (-1)^n m_4) \right] + \left[\tau - \frac{l^2}{\pi^2 n^2 \lambda_1} \left(1 + \exp\left(-\frac{\lambda_2 \pi^2 n^2}{l^2} \tau\right) \right) \right] \times \left[\frac{(\lambda_1 - a)d_2}{d_1} (m_1 - (-1)^n m_2) + (\lambda_1 - a)(m_3 + (-1)^n m_4) \right]. \quad (37)$$

Полученные аналитические выражения удовлетворяют краевым условиям (10). Справедливость их решения подтверждается также анализом размерностей.

Рассмотрим иной вариант решения задачи для схемы 1. При исследовании ТВС на стержнях, термоизолированных с «холодного» конца, схема 1 можно представить в виде полуограниченного стержня.

Рассмотрим решение уравнений (1) и (2) без учета термовлагопроводности (т. е. без второго члена правой части выражения (2)). Такая схема применима при определении ТВС образцов с повышенной начальной влажностью ($W \geq 0,65 W_n$).

В таком случае краевые условия можно записать в виде

$$t(z, 0) = t_n; t(0, \tau) = t_n + m_1 \tau; \frac{\partial t}{\partial z} \Big|_{z=l} = 0; \quad (38)$$

$$W(z, 0) = W_n; W(0, \tau) = W_n - m_2 \tau; \frac{\partial W}{\partial z} \Big|_{z=l} = 0. \quad (39)$$

Введем переменную

$$V(z, \tau) = W(z, \tau) - (W_n - m_2 \tau). \quad (40)$$

Подставляя данные (39) и (40) в выражение (2), получаем неоднородное уравнение с новыми краевыми условиями

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} + m_2; \quad (41)$$

$$V(z, 0) = 0; V(0, \tau) = 0; \frac{\partial V}{\partial z} \Big|_{z=l} = 0, \quad (42)$$

где $a_1 = \frac{a_{ж}}{1-\varepsilon}$ — коэффициент влагопроводности двухфазной влаги;

$$V(z, \tau) = \sum_1^{\infty} V_n(\tau) \cdot \sin \frac{(2n+1)\pi z}{2l}. \quad (43)$$

Решение выражения (43) удовлетворяет граничным условиям при любом значении $V_n(\tau)$. Подставляя выражение (43) в уравнение (41), получаем

$$\sum_0^{\infty} V_n''(\tau) + a_1 \left[\frac{(2n+1)\pi}{2l} \right]^2 \cdot \sin \frac{(2n+1)\pi z}{2l} = m_2. \quad (44)$$

Для выполнения условия (44) необходимо, чтобы

$$\begin{aligned} V_n''(\tau) + a_1 \left[\frac{(2n+1)\pi}{2l} \right]^2 V_n(\tau) &= \\ &= \frac{2m_2}{l} \int_0^l \sin \frac{(2n+1)\pi z}{2l} dz = \\ &= -\frac{2m_2}{l} \cos \frac{(2n+1)\pi z}{2l} \Big|_0^l = \frac{4m_2}{(2n+1)\pi}; \end{aligned} \quad (45)$$

$$V_n'(\tau) \Big|_{\tau=0} = 0. \quad (46)$$

Решением системы уравнений (45) и (46) будет следующее:

$$\begin{aligned} V_n(\tau) &= \frac{4m_2}{(2n+1)\pi} \int_0^{\tau} \exp \left\{ \left[-a_1 \frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \right] (\tau - \tau') \right\} dt = \\ &= \frac{16m_2 l^2}{(2n+1)^3 \pi^3 a} \left\{ 1 - \exp \left[-a_1 \frac{(2n+1)^2 \pi^2 \tau}{4l^2} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (47)$$

Из выражения (39) имеем

$$\begin{aligned} V_n(\tau, z) &= \frac{16m_2 l^2}{a_1 \pi^3} \times \\ &\times \sum_0^{\infty} \frac{1 - \exp \left[-\frac{a_1 \tau (2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \right]}{(2n+1)^3} \times \\ &\times \sin \frac{(2n+1)\pi z}{2l}. \end{aligned} \quad (48)$$

Подставив уравнение (48) в выражение (39), получим выражение для расчета поля важности

$$W(z, \tau) = W_{н} - m_2 \tau + \frac{16m_2 l^2}{a_1 \pi^3} \times$$

$$\begin{aligned} &\times \sum_0^{\infty} \frac{1 - \exp \left[-a_1 \frac{(2n+1)^2 \pi^2 \tau}{4l^2} \right]}{(2n+1)^3} \times \\ &\times \sin \frac{(2n+1)\pi z}{2l}. \end{aligned} \quad (49)$$

Скорость изменения влажности принимает вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial t} &= -m_2 + \frac{4m_2}{\pi} \times \\ &\times \sum_0^{\infty} \frac{\exp \left[-a_1 \frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \tau \right]}{(2n+1)} \times \\ &\times \sin \frac{(2n+1)\pi z}{2l}. \end{aligned} \quad (50)$$

Подставляя уравнение (50) в выражение (1) и используя краевые условия (15), получаем

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + b [f(z, \tau) - m_2]; \quad (51)$$

$$t(z, 0) = t_{н}; t(0, \tau) = t_{н} + m_1 \tau; \frac{\partial t}{\partial z} \Big|_{z=l} = 0, \quad (52)$$

где

$$\begin{aligned} f(z, \tau) &= \frac{4m_2}{\pi} \times \\ &\times \sum_0^{\infty} \frac{\exp \left[-\frac{a_1 \tau (2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \right]}{2n+1} \times \\ &\times \sin \frac{(2n+1)\pi z}{2l}. \end{aligned} \quad (53)$$

Для решения уравнения (52) введем переменную

$$V(z_1, \tau) = t(z, \tau) - (\tau_{н} + m_1 \tau). \quad (54)$$

Тогда получаем

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} - a \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = [f(z, \tau) - m_2] b - m_1; \quad (55)$$

$$V(z, 0) = 0; V(0, \tau) = 0; \frac{\partial V}{\partial z} \Big|_{z=l} = 0. \quad (56)$$

Решение задачи (55), (56) будем искать в виде

$$V = V_1 + V_2, \quad (57)$$

где V_1 — решение (55), (56) при $m_1 = m_2 = 0$, а V_2 при $f(z, \tau) = 0$.

По аналогии с решением системы (17), (18) имеем

$$V_2(z, \tau) = -\frac{16(m_2b + m_1)l^3}{a\pi^3} \times \sum_0^\infty \frac{1 - \exp\left[-a_1 \frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \tau\right]}{(2n+1)^3} \times \sin \frac{(2n+1)\pi z}{2l}. \quad (58)$$

$$V_1(z, \tau) = \sum_0^\infty V_{n1}(\tau) \cdot \sin \frac{(2n+1)\pi z}{2l}. \quad (59)$$

Подставляя полученное выражение (59) в уравнение (55) при $m_1 = m_2 = 0$, получаем

$$\sum_0^\infty V_{n1}(\tau) + a \frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} V_{n1}(\tau) \cdot \sin \frac{(2n+1)\pi z}{2l} = \sum_0^\infty \frac{4m_2b}{(2n+1)\pi} \exp\left[-\frac{a(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \tau\right] \cdot \sin \frac{(2n+1)\pi z}{2l}. \quad (60)$$

Это равенство возможно лишь при условии

$$V_{n1}(\tau) + a \frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} V_{n1}(\tau) = \frac{4m_2b}{(2n+1)\pi} \cdot \exp\left[-a_1 \frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \tau\right]. \quad (61)$$

Из начального условия (46) следует, что

$$V_{n1}(\tau)|_{\tau=0} = 0. \quad (62)$$

Решением системы (61), (62) является функция

$$V_{n1}(\tau) = \frac{4m_2b}{(2n+1)\pi} \cdot \int_0^\tau \exp\left[-a_1 \frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \tau'\right] \times \exp\left[-a \frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} (\tau - \tau')\right] d\tau' = -\frac{16m_2bl^2}{(a_1 - a)(2n+1)^3 \pi^3} \times \left\{ \exp\left[-a_1 \frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \tau\right] - \exp\left[-a \frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \tau\right] \right\}. \quad (63)$$

Подставляя уравнение (63) в выражение (59), имеем

$$V_1(z, \tau) = -\frac{16m_2bl^2}{(a_1 - a)\pi^3} \sum_0^\infty \frac{1}{(2n+1)^3} \times \left\{ \exp\left[-\frac{a_1(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \tau\right] - \exp\left[-\frac{a(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \tau\right] \right\} \times \sin \int_0^\tau \frac{(2n+1)\pi z}{2l}. \quad (64)$$

Используя уравнения (55), (57), окончательно получаем из расчета тепломассообмена в образце

$$t(z, \tau) = t_n + m_1\tau - \frac{16l^2}{a\pi^3} \sum_0^\infty \frac{1}{(2n+1)^3} \left\{ \frac{m_2b}{a_1 - a} \times \exp\left[-\frac{a_1(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \tau\right] + \left(-\frac{m_2b}{a_1 - a} - \frac{m_2b + m_1}{a} \right) \times \left[-\frac{a(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \tau\right] + \frac{m_2b + m_1}{a} \right\} \times \sin \frac{(2n+1)\pi z}{2l}, \quad (65)$$

где $b = \frac{\varepsilon \rho_n}{c}$.

Рассмотрим решение уравнений (1), (2) без учета второго члена правой части уравнения (1) при краевых условиях (15).

Опуская промежуточные решения, получаем выражения для расчета поля температуры

$$t(z, \tau) = t_n + m_1\tau - \frac{16l^2}{a\pi^3} \times \sum_1^\infty \frac{1}{(2n+1)^3} \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{a(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \tau\right] \right\} \times \sin \frac{(2n+1)\pi z}{2l}. \quad (66)$$

$$W(z, \tau) = W_n - m_2\tau + \frac{16l^2}{a\pi^3} \sum_1^\infty \frac{1}{(2n+1)^3} \times \left\{ \exp\left[-\frac{a(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \tau\right] \times \frac{a_1 m_1 b}{a - a_1} - \left(m_2 + \frac{m_1 b_1 a_1}{a - a_1} \right) \times \exp\left[-\frac{a(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \tau\right] + m_1 b_1 + m_2 \right\} \times \sin \frac{(2n+1)\pi z}{2l}. \quad (67)$$

Рассмотрим решения задачи для схемы 2. Схема теплообмена без массообмена.

Решим уравнение

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \quad (68)$$

при следующих краевых условиях:

$$\begin{cases} t(z, 0) = t_n, & 0 \leq z \leq l, \\ t(0, \tau) = t_n + m_1 \tau, & m_2 < m_1, \\ t(l, \tau) = t_n + m_2 \tau, & 0 \leq \tau \leq 3,6 \cdot 10^3 \text{ с}. \end{cases} \quad (69)$$

Введем новую функцию $T(z, \tau) = t(z, \tau) - t_n$.

Тогда имеем следующее уравнение с новыми краевыми условиями:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}; \quad (70)$$

$$\begin{cases} T(z, 0) = 0 \\ T(0, \tau) = m_1 \tau \\ T(l, \tau) = m_2 \tau \end{cases} \quad (71)$$

Решение уравнения (70) найдем в виде

$$\begin{aligned} T &= \frac{2a\pi}{l^2} \sum_1^\infty n \exp\left[-\frac{an^2\pi^2}{l^2}\tau\right] \cdot \sin \frac{\pi n z}{l} \cdot \int_0^z \exp\frac{an^2\pi^2}{l^2}\lambda \times \\ &\quad \times [m_1\lambda - (-1)^n m_2] d\lambda = \\ &= \frac{2a\pi}{l^2} \sum_1^\infty \exp\left[-\frac{an^2\pi^2}{l^2}\tau\right] \cdot \int_0^z \exp\frac{an^2\pi^2}{l^2}\lambda d\lambda = \\ &= \frac{2l^2}{a\pi^3} \sum_1^\infty \frac{m_1 - (-1)^n m_2}{n^3} \cdot \sin \frac{\pi n z}{l} \cdot \left[\frac{an^2\pi^2}{l^2}\tau - 1 + \exp\left(-\frac{an^2\pi^2}{l^2}\tau\right)\right]. \end{aligned} \quad (72)$$

Отсюда

$$\begin{aligned} t(z, \tau) &= t_n + \frac{2l^2}{a\pi^3} \sum_1^\infty \frac{m_1 - (-1)^n m_2}{n^3} \cdot \sin \frac{\pi n z}{l} \times \\ &\quad \times \left[\frac{an^2\pi^2}{l^2}\tau - 1 + \exp\left(-\frac{an^2\pi^2}{l^2}\tau\right)\right]. \end{aligned} \quad (73)$$

Поскольку ряд, стоящий в правой части равенства (70) удовлетворяет условиям теоремы Лейбница о знакопеременных рядах, остаток ряда не превосходит по абсолютной величине первый из отброшенных членов, т. е.

$$\begin{aligned} \left| R_n\left(\frac{l}{2}, \tau\right) \right| &= \frac{2l^2}{a\pi^3} \times \\ &\quad \times \int_{k=n+1}^{+\infty} \frac{m_1 - (-1)^n m_2}{n^3} \times \\ &\quad \times \left[\frac{an^2\pi^2}{l^2}\tau - 1 + \exp\left(-\frac{an^2\pi^2}{l^2}\tau\right)\right] \leq \\ &\leq \frac{2l^2}{a\pi^3} \frac{m_1 - (-1)^n m_2}{n^3} \times \\ &\quad \times \left[\frac{a(n+1)^2\pi^2}{l^2}\tau - 1 + \exp\left(-\frac{a(n+1)^2\pi^2}{l^2}\tau\right)\right]. \end{aligned} \quad (74)$$

Оценим отношение суммы всех показателей (74) имеем

$$\begin{aligned} \frac{R_n\left(\frac{l}{2}, \tau\right)}{\frac{2l^2}{a\pi^3} (m_1 + m_2) \left[\frac{a\pi^2}{l^2}\tau - 1 + \exp\left(-\frac{a\pi^2\tau}{l^2}\right)\right]} &\leq \\ &\leq \frac{1}{27} \frac{\left[\frac{9\pi^2 a}{l^2}\tau - 1 + \exp\left(-\frac{9\pi^2 a}{l^2}\tau\right)\right]}{\left[\frac{\pi^2 a}{l^2}\tau - 1 + \exp\left(-\frac{\pi^2 a}{l^2}\tau\right)\right] - \varepsilon}, \end{aligned} \quad (75)$$

так как

$$\begin{aligned} \frac{\pi^2 a}{l^2}\tau - \frac{1}{9} + \exp\left(-\frac{9\pi^2 a}{l^2}\tau\right) &< \\ &< \frac{\pi^2 a\tau}{l} - 1 + \exp\left(-\frac{a\pi^2\tau}{l^2}\right), \end{aligned} \quad (76)$$

$$\frac{9\left[\frac{\pi^2 a}{l^2}\tau - \frac{1}{9} + \exp\left(-\frac{9\pi^2 a}{l^2}\tau\right)\right]}{\frac{\pi^2 a}{l^2}\tau - 1 + \exp\left(-\frac{a\pi^2\tau}{l^2}\right)} < 9. \quad (77)$$

Таким образом, $\varepsilon = \frac{1}{3}$ и, следовательно,

$$\frac{R_1\left(\frac{l}{2}, \tau\right)}{\frac{2l^2}{A\pi^3} (m_1 + m_2) \left[\frac{a\pi^2}{l^2}\tau - 1 - \exp\left(-\frac{a\pi^2}{l^2}\tau\right)\right]} \quad (78)$$

Для оценки погрешности, допускаемой при замене суммы ряда (72) его частичной суммой в других точках $x \neq l/2$, воспользуемся признаком Абеля. При приближении к концам интервала $0 \leq x \leq l$ оценка остатка ряда по признаку Абеля становится непригодной.

Для равномерной оценки остатка ряда на всем интервале $0 \leq x \leq l$ применим следующий способ:

$$\begin{aligned} R_n(z, \tau) &= \left| \frac{2l^2}{a\pi^3} \sum_{k=n+1}^\infty \frac{m_1 - (-1)^k m_2}{k^3} \left[\frac{ak^2\pi^2}{l^2}\tau - 1 + \exp\left(-\frac{ak^2\pi^2}{l^2}\tau\right)\right] \right| \times \\ &\quad \times \sin \frac{\pi k z}{l} \leq \frac{2l^2}{a\pi^3} \sum_{k=n+1}^\infty \frac{m_1 - (-1)^k m_2}{k^3} \left[\frac{ak^2\pi^2}{l^2}\tau - 1 + \exp\left(-\frac{ak^2\pi^2}{l^2}\tau\right)\right] < \\ &< \frac{2l^2}{a\pi^3} \int_{A_n}^{+\infty} \frac{m_1 + m_2}{x^3} \left[\frac{a\pi^2}{l^2}\tau x^2 - 1 + \exp\left(-\frac{a\pi^2}{l^2}\tau x^2\right)\right] dx = \\ &= \frac{2l^2}{a\pi} (m_1 + m_2) \int_{A_n}^{+\infty} \frac{1}{\xi} \left[\xi^2 - 1 + \exp(-\xi^2)\right] d\xi = \\ &= \frac{2l^2}{a\pi} (m_1 + m_2) \int_{A_n}^{+\infty} \left[\xi - \frac{1}{\xi} + \frac{\exp(-\xi^2)}{\xi}\right] d\xi, \end{aligned} \quad (79)$$

где

$$\xi = \frac{x\pi}{l} \sqrt{a\tau}; \quad (80)$$

$$A_n = \frac{\pi n}{l} \sqrt{a\tau}. \quad (81)$$

После интегрирования получаем

$$\int_{A_n}^{+\infty} \left[\xi - \frac{1}{\xi} + \frac{\exp(-\xi^2)}{\xi} \right] d\xi = \left(\xi^2 - \ln \xi \Big|_{A_n}^{+\infty} + \int_{A_n}^{+\infty} \frac{\exp(-\xi^2)}{\xi} d\xi; \quad (82)$$

$$\int_{A_n}^{+\infty} \frac{\exp(-\xi^2)}{\xi} d\xi = \frac{1}{2A_n^2} \exp(-A_n^2) + \int_{A_n}^{+\infty} \frac{\exp(-\xi^2)}{\xi^3} d\xi. \quad (83)$$

Однако

$$\int_{A_n}^{+\infty} \frac{\exp(-\xi^2)}{\xi^3} d\xi < \exp(-A_n^2) \int_{A_n}^{+\infty} \frac{d\xi}{\xi^3} = \frac{\exp(-A_n^2)}{2A_n^2}. \quad (84)$$

Таким образом, выражение для равномерной оценки остатка ряда будет иметь следующий вид

$$|R_n(x, \tau)| < \frac{2l^2}{a\pi} (m_1 + m_2) \frac{\exp(-A_n^2)}{2A_n^2}, \quad (85)$$

где

$$A_n = \frac{\pi n}{l} \sqrt{a\tau}. \quad (86)$$

Выражение (86) дает возможность с заданной точностью определять значения температуры t по формуле (73).

Решение задачи для расчетной схемы 3 аналогично решению для схемы 2.

Окончательное выражение для поля влажности в образце принимает вид

$$W(z, \tau) = W_n + \frac{2l^2}{a_1\pi^3} \sum_1^{\infty} \frac{m_3 - (-1)^n m_4}{n^3} \cdot \sin \frac{\pi n z}{l} \times \left[\frac{a n^2 \pi^2}{l^2} \tau - 1 + \exp\left(-\frac{a n^2 \pi^2}{l^2} \tau\right) \right]. \quad (87)$$

Изучение ТВС грунтов, как это следует из приведенных ранее разделов с достаточной достоверностью можно проводить на образцах с нарушенной структурой. Коэффициенты уравнений (1) и (2), характеризующие тепломассообмен в грунтах, можно условно подразделить на группы: тепловые — a, b , влажностные — $a_1(a_{ж}, a_n)$ и термоградиентные — b_1 .

На рисунке представлена структурная схема основных коэффициентов тепломассообмена в грунтах.

Значение коэффициента температуропроводности a является функцией многих переменных: $a = f(\lambda, c, W, \Phi_w, X, \Gamma)$, т. е. зависит от теплопроводности λ , удельной теплоемкости c , влажности, фазового состава влаги Φ_w , химического X и гранулометрического Γ составов. Изучение влияния перечисленных физических и тепловых характеристик на коэффициент температуропроводности грунтов является сложной теоретической и практической задачей. Важно учитывать только те факты, которые в значительной степени могут их исказить. Как было отмечено в работах [17, 21], на значение коэффициента теплопроводности и температуропроводности оказывают существенное влияние плотность, влажность и тип грунта. Практический интерес представляет исследование влияния перечисленных факторов на величину тепло- и температуропроводности различных грунтов. При построении зависимостей $\lambda = f(W, \delta)$, $a = f(W, \delta)$ предпочтительнее плотность δ и влажность W представить в безразмерном виде, т. е. $\lambda = f(K_y, W_{от})$, $a = f(K_y, W_{от})$.

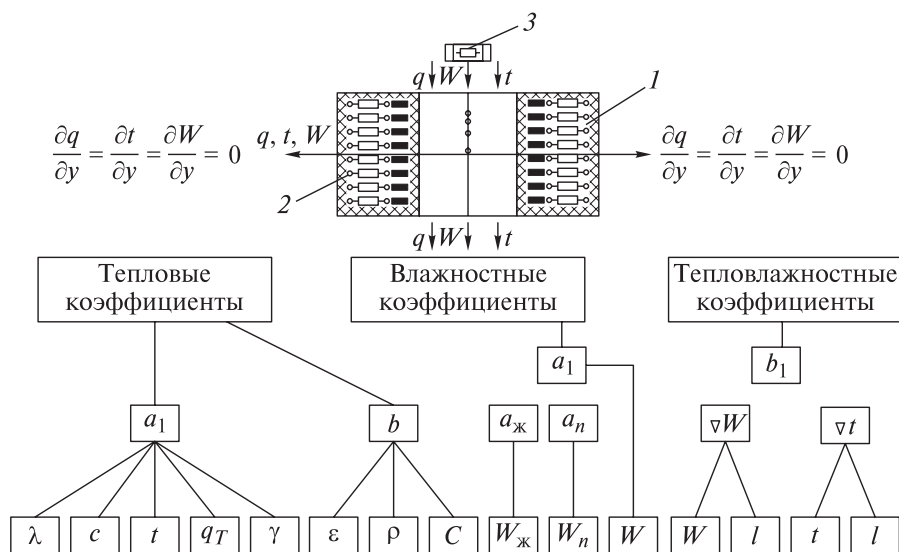
Для экспериментального определения коэффициента теплопроводности применяют стационарные и нестационарные методы. Стационарные методы, основанные на законе Фурье для стационарного теплового потока, точнее, чем нестационарные, поскольку в стационарном режиме можно с более высокой точностью выполнить заданные граничные условия, а проверку воспроизводимости прибора осуществить по эталонным материалам с известными теплофизическими характеристиками.

Коэффициенты температуропроводности определяют, как правило, нестационарными методами.

Для получения достоверных сведений о теплофизических характеристиках грунтов и материалов наиболее приемлемыми являются комплексные методы. С помощью таких методов по одному эксперименту и на одном образце можно получить все основные теплофизические характеристики исследуемых материалов, т. е. λ, c, a . Образец грунта 1 (см. рисунок) помещается в специальную адиабатическую оболочку 2 и облучается инфракрасным источником тепла 3, т. е. в образце выполняются условия

$$\frac{dt}{dy} = 0; \quad \frac{\partial W}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial t}{\partial z} \neq 0; \quad \frac{\partial W}{\partial z} \neq 0. \quad (88)$$

Влияние коэффициента, определяющего теплообмен за счет фазовых превращений влаги, в тепловых процессах в грунтах значительно, так как при фазовом переходе выделяется (поглощается) до $2,26 \cdot 10^6$ Дж/кг воды. Испарение (конденсация) 1 кг воды, находящейся в порах грунта, существенно изменяет его теплосодержание.



Структурная схема связи основных коэффициентов тепломассообмена в грунтах: 1 — исследуемый образец; 2 — адиабатическая оболочка; 3 — инфракрасный источник тепла
 Structural connection scheme of the main coefficients of heat and mass transfer in soils: 1 — studied sample; 2 — adiabatic shell; 3 — infrared heat source

Для определения коэффициента b необходимо знать значения критерия фазового превращения ϵ при конденсации водяного пара в жидкость, значения скрытой теплоты парообразования ρ_n и удельной теплоемкости c исследуемого грунта.

Коэффициенты ϵ и ρ_n с достаточной полнотой изучены в теплофизике. Удельную теплоемкость грунтов и материалов можно определить в нестационарном тепловом режиме, измерив во времени удельные тепловые потоки на входе и выходе из образца и среднее приращение температуры.

Значения удельных тепловых потоков q в настоящей работе предлагается измерять с помощью специальных тепловых преобразователей — батарейных теплотметрических датчиков (ТД). Особенностью таких измерений является то, что величина сигнала датчика пропорциональна пронизывающему образец тепловому потоку и не зависит от температуры. Влажностный коэффициент a_1 системы (2), характеризующий влагопроводность двухфазной влаги, можно записать в виде

$$a_1 = a_n + a_{ж}. \tag{89}$$

Для определения коэффициентов влагопроводности жидкой фазы $a_{ж}$ необходимо знать величину потока жидкообразной влаги $q_{ж}$ и влажность образца W . Определение этих характеристик сопряжено с измерением вдоль оси исследуемого образца изменения влажности во времени. Поэтому информацию о влажности следует получать многократно в ходе всего опыта, не нарушая структуру и массу образца. Для получения информации о влажности пригодны физические методы или метод непрерывного взвешивания

образца, подвешенного в контейнере одним концом к чашке аналитических весов.

Определив количество жидкообразной влаги в образце и парообразную влагу W_n можно установить расчетом.

Получив значение W_n вдоль исследуемого образца и зная градиенты температуры, можно рассчитать потоки водяного пара q_n .

Линейные размеры исследуемых образцов l задаются при их формовке. Увеличением размеров образца в результате нагрева можно пренебречь, так как эта величина не вносит существенных искажений в измерение ТВС грунтов. Точки измерения влажности вдоль образца (l, l_1, l_2, l_3, \dots) при комплексном определении ТВС определяются при фиксированном размещении датчиком влажности на стенке контейнера.

Выводы

Экспериментальное определение важнейших тепловых (λ, a, c, q, t) и влажностных ($W, W_n, W_{ж}$) характеристик позволит получить значения коэффициентов a, a_1, b, b_1 в уравнениях (1) и (2), что даст возможность рассчитать поля влажности и температуры для технологического или эксплуатационного тепломассообмена при строительстве лесовозных автомобильных дорог.

Список литературы

[1] Хомяк Я.В. Проектирование сетей автомобильных дорог М.: Транспорт, 1983. 207 с.
 [2] Чернышова Е.В. Методы формирования цифровой модели местности при трассировании лесовозных автомобильных дорог // Системы. Методы. Технологии, 2017. № 3(35). С. 143–148.

- [3] Тихомиров П.В., Скрыпников А.В., Чернышова Е.В., Бондарев А.Б., Казачек М.Н., Брюховецкий А.Н. Анализ современных методов изыскания лесовозных автомобильных дорог // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2023. № 242. С. 179–188.
- [4] Mogutnov R.V., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Zavrazhnikov A.I., Belyaev A.N., Zelikov V.A., Tikhomirov P.V., Mikheev N.V. Designing Mathematical Models of Geometric and Technical Parameters for Modern Road-Building Machines Versus the Main Parameter of the System // Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology: proc. of the Int. Symp. «Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research» dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019), Grozny, 12–13 June 2019. V. 1. Grozny: Atlantis Press, 2019, pp. 823–827. DOI: 10.2991/isees-19.2019.165
- [5] Berestnev O, Soliterman Y, Goman A Development of Scientific Bases of Forecasting and Reliability Increase of Mechanisms and Machines — One of the Key Problems of Engineering Science // Int. Symp. on History of Machines and Mechanisms Proceedings, 2000, pp. 325–332.
- [6] Козлов В.Г. Методы, модели и алгоритмы проектирования лесовозных автомобильных дорог с учетом влияния климата и погоды на условия движения: дис. ... д-ра техн. наук. 05.21.01 Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства. Архангельск, 2017. 406 с.
- [7] Бондарев А.Б., Козлов Д.Г. Обследование эксплуатационного состояния лесовозных автомобильных дорог // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: Материалы Международ. науч.-практ. конф. (Воронеж, 06–07 июня 2022 г.). Воронеж: Изд-во Воронежского ГАУ, 2022. С. 196–200.
- [8] Бойков П.А., Козлов Д.Г. Целесообразность мероприятий по повышению технико-эксплуатационного состояния лесовозных дорог // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: Материалы Международ. науч.-практ. конф. (Воронеж, 06–07 июня 2022 г.). Воронеж: Изд-во Воронежского ГАУ, 2022. С. 190–195.
- [9] Боровлев А.О., Козлов Д.Г., Тихомиров П.В., Логойда В.С. Методология проектирования лесовозных автомобильных дорог // Проблемы ресурсообеспеченности и перспективы развития агропромышленного комплекса: Материалы Нац. науч.-практ. конф. (01 октября 2021 г., г. Воронеж). Воронеж: Изд-во Воронежского ГАУ, 2021. С. 168–175.
- [10] Козлов Д.Г., Никитин В.В., Скрыпников А.В., Брюховецкий А.Н., Сапелкин Р.С., Тихомиров П.В., Тверитнев О.Н., Денисенко В.В. Интеллектуальные системы проектирования сетей лесовозных автомобильных дорог. Воронеж: Изд-во Воронежского ГАУ, 2021. 206 с.
- [11] Константинов А.Р. Испарение в природе. Л.: ГИМИЗ, 1968. 59 с.
- [12] Мезенцев В.С. Расчеты водного баланса. Омск: ОмСХИ, 1976. 74 с.
- [13] Сиденко В.М. Стандартизация и контроль качества в дорожном строительстве. Киев: Высшая школа, 1985. 256 с.
- [14] Никитин В.В., Козлов Д.Г., Скрыпников А.А., Брюховецкий А.Н., Викулин И.А., Злобина Н.И., Сапелкин Р.С. Методический подход к расчёту удельных затрат при строительстве лесовозных дорог // Строительные и дорожные машины, 2021, № 12. С. 50–54.
- [15] Никитин В.В., Денисенко В.В., Скрыпников А.В., Брюховецкий А.Н., Тихомиров П.В., Козлов Д.Г., Сапелкин Р.С., Прокопец В.С. Методика разработки нормативов для проектирования лесотранспортных сетей // Строительные и дорожные машины, 2021. № 12. С. 45–49.
- [16] Прокопец В.С., Скрыпников А.А., Козлов Д.Г., Тихомиров П.В., Букреев В.Ю., Казачек М.Н. Методика проведения обследования эксплуатационного состояния лесовозных автомобильных дорог // Строительные и дорожные машины, 2022. № 2. С. 51–54.
- [17] Тимофеев В.А., Тихомиров П.В., Козлов Д.Г., Тверитнев О.Н., Скрыпников А.А., Боровлев Ю.А., Щербаков Е.Д., Казачек М.Н., Жук А.Ю. Исследование состояний подсистемы последовательного анализа лесовозных автомобильных дорог с прогнозированием объема контрольно-приемочных измерений на основе теории Марковских случайных процессов // Системы. Методы. Технологии, 2022. № 3(55). С. 146–151.
- [18] Козлов Д.Г. Анализ видов и назначений ведомственных дорог // Теория и практика инновационных технологий в АПК: Материалы Нац. науч.-практ. конф. (Воронеж, 19–21 апреля 2022 г.). Воронеж: Изд-во Воронежского ГАУ, 2022. С. 336–342.
- [19] Козлов Д.Г. Технологические особенности автомобильных лесовозных дорог // Теория и практика инновационных технологий в АПК: Материалы Нац. науч.-практ. конф. (Воронеж, 19–21 апреля 2022 г.). Воронеж: Изд-во Воронежского ГАУ, 2022. С. 343–349.
- [20] Бондарев А.Б., Козлов Д.Г. Обследование эксплуатационного состояния лесовозных автомобильных дорог // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: Материалы Международ. науч.-практ. конф. (Воронеж, 06–07 июня 2022 г.). Воронеж: Изд-во Воронежского ГАУ, 2022. С. 196–200.
- [21] Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Samtsov V.V., Nikitin V.V., Boltnev D.E., Borovlev A.O. Influence of natural and technogenic factors on the complexity of construction of timber highways // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science (Zernograd, Rostov Region, 27–28 August, 2020). Zernograd, Rostov Region: IOP Publishing Ltd, 2021, p. 012137.
- [22] Zelikov V.A., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Samtsov V.V., Tikhomirov P.V., Borovlev A.O. Structural Models of Road Landscapes and Microlandscapes // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Zernograd, Rostov Region, 27–28 August, 2020). Zernograd, Rostov Region: IOP Publishing Ltd, 2021, p. 012116.
- [23] Боровлев А.О., Скрыпников А.В., Высоцкая И.А., Брюховецкий А.Н., Никитин В.В. Сочетания криволинейных участков плана и продольного профиля трассы лесовозных автомобильных дорог // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2021. № 235. С. 19–207.
- [24] Жук А.Ю., Саблин С.Ю., Скрыпников А.В., Болтнев Д.Е., Высоцкая И.А. Исследование математической модели рельефа местности при проектировании автомобильных дорог // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 2(50). С. 88–93.
- [25] Popov V.N., Vasilenko V.N., Khvostov V.A., Denisenko V.V., Skrypnikov A.V., Ivanov A.V., Belyaev A.N., Stukalo O.G. Security threats to personal data in the implementation of distance educational services using mobile technologies // J. of Theoretical and Applied Information Technology, 2021, v. 99, no. 15, pp. 3935–3946.

Сведения об авторах

Брюховецкий Андрей Николаевич — экстерн, канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», bruhoveckiy@rambler.ru

Скрыпников Алексей Васильевич — д-р техн. наук, декан факультета «Управление и информатика в технологических системах», ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», skrypnikovvsafe@mail.ru

Козлов Дмитрий Геннадиевич — канд. техн. наук, зам. декана по трудоустройству Агроинженерного факультета, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», dimvsau@mail.ru

Романов Павел Олегович — экстерн, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», Romanov_pa@yandex.ru

Бойков Павел Александрович — экстерн, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», pboy-kov23@mail.ru

Казачек Мария Николаевна — аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», kazachekmaria@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.01.2023.

Одобрено после рецензирования 03.07.2023.

Принята к публикации 23.08.2023.

STRUCTURAL DIAGRAM OF TRUCK HAULROADS HYGROTHERMAL SOILS PROPERTIES

**A.N. Bryukhovetsky¹, A.V. Skrypnikov¹, D.G. Kozlov²,
P.V. Romanov¹, P.A. Bokov¹, M.N. Kazachek³**

¹Voronezh State University of Engineering Technologies, 19, Revolution Av., 394036, Voronezh, Russia

²Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, 1, Michurina st., 394087, Voronezh, Russia

³Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov, 8, Timiryazev st., 394087, Voronezh, Russia

dimvsau@mail.ru

The analysis of the calculation schemes of the truck haulroads hygrothermal soils properties is presented, which showed its advantages and disadvantages, also a block diagram of the most rational method for determining the hygrothermal properties was proposed while mathematical modeling was carried out with the identification of all factors taken into account in the analysis of the haulroads soils. The objective function is defined, which is the main part of the mathematical model and includes all the elements and connections of the system for studying the elements of the haulroads soils properties. As a result of mathematical modeling, the most important hygrothermal characteristics were determined to obtain the coefficient values of the system, which makes it possible to calculate the field of humidity and temperature for technological or operational heat and mass transfer in the construction of haulroads. As a result of mathematical modeling, a structural diagram of the relationship of the main coefficients was obtained, which allows to simulate hygrothermal transfer in soils to the greatest extent, which in turn allows to substantiate the shape and properties of samples, as well as the initial and boundary conditions when determining the heat and moisture properties of the soil.

Keywords: soil properties, hygrothermal properties of soil, heat flow, thermal conductivity of soils, truck haulroads

Suggested citation: Bryukhovetskiy A.N., Skrypnikov A.V., Kozlov D.G., Romanov P.V., Boykov P.A., Kazachek M.N. *Strukturnaya skhema issledovaniya teplovlazhnostnykh svoystv gruntov lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Structural diagram of truck haulroads hygrothermal soils properties]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 6, pp. 126–138. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-126-138

References

- [1] Khomyak Ya.V. *Proektirovanie setey avtomobil'nykh dorog* [Design of highway networks]. Moscow: Transport, 1983, 207 p.
- [2] Chernyshova E.V. *Metody formirovaniya tsifrovoy modeli mestnosti pri trassirovani lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Methods for the formation of a digital terrain model when tracing logging roads]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2017, no. 3(35), pp. 143–148.
- [3] Tikhomirov P.V., Skrypnikov A.V., Chernyshova E.V., Bondarev A.B., Kazachek M.N., Bryukhovetskiy A.N. *Analiz sovremennykh metodov izyskaniya lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Analysis of modern methods of surveying logging roads]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy], 2023, no. 242, pp. 179–188.
- [4] Mogutnov R.V., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Zavrazhnov A.I., Belyaev A.N., Zelikov V.A., Tikhomirov P.V., Mikheev N.V. *Designing Mathematical Models of Geometric and Technical Parameters for Modern Road-Building Machines Versus the*

- Main Parameter of the System. Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology: proc. of the Int. Symp. «Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research» dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019), Grozny, 12–13 June 2019. V. 1. Grozny: Atlantis Press, 2019, pp. 823–827. DOI: 10.2991/isees-19.2019.165
- [5] Berestnev O, Soliterman Y, Goman A Development of Scientific Bases of Forecasting and Reliability Increase of Mechanisms and Machines — One of the Key Problems of Engineering Science. Int. Symp. on History of Machines and Mechanisms Proceedings, 2000, pp. 325–332.
- [6] Kozlov V.G. *Metody, modeli i algoritmy proektirovaniya lesovoznykh avtomobil'nykh dorog s ucheto vliyaniya klimata i pogody na usloviya dvizheniya* [Methods, models and algorithms for designing logging roads, taking into account the influence of climate and weather on traffic conditions]. Dis. Dr. Sci. (Tech.) 05.21.01. Arkhangelsk, 2017, 406 p.
- [7] Bondarev A.B., Kozlov D.G. *Obsledovanie ekspluatatsionnogo sostoyaniya lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Survey of the operational state of logging roads]. *Energoeffektivnost' i energosberezhenie v sovremennom proizvodstve i obshchestve: Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Energy efficiency and energy saving in modern production and society: Proceedings of the international scientific and practical conference], Voronezh, June 06–07, 2022. Voronezh: Voronezh State Agrarian University, 2022, pp. 196–200.
- [8] Boykov P.A., Kozlov D.G. *Tselesoobraznost' meropriyatiy po povysheniyu tekhniko-ekspluatatsionnogo sostoyaniya lesovoznykh dorog* [Feasibility of measures to improve the technical and operational condition of logging roads]. *Energoeffektivnost' i energosberezhenie v sovremennom proizvodstve i obshchestve: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Energy efficiency and energy saving in modern production and society: materials of the International Scientific and Practical Conference]. Voronezh, June 06–07, 2022. Voronezh: Voronezh State Agrarian University, 2022, pp. 190–195.
- [9] Borovlev A.O., Kozlov D.G., Tikhomirov P.V., Logoyda V.S. *Metodologiya proektirovaniya lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Methodology for designing logging roads]. *Problemy resursoobespechennosti i perspektivy razvitiya agropromyshlennogo kompleksa: Materialy natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Problems of resource availability and prospects for the development of the agro-industrial complex: Proceedings of the national scientific and practical conference]. Voronezh, October 01, 2021. Voronezh: Voronezh State Agrarian University, 2021, pp. 168–175.
- [10] Kozlov D.G., V Nikitin V., Skrypnikov A.V., Bryukhovetskiy A.N., Sapelkin R.S., Tikhomirov P.V., Tveritnev O.N., Denisenko V.V. *Intellektual'nye sistemy proektirovaniya setey lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Intelligent systems for designing networks of logging roads]. Voronezh: Voronezh State Agrarian University, 2021, 206 p.
- [11] Konstantinov A.R. *Isparenie v prirode* [Evaporation in nature]. Leningrad: GIMIZ, 1968, 59 p.
- [12] Mezentsev V.S. *Raschety vodnogo balansa* [Water balance calculations]. Omsk: OmSKhI, 1976, 74 p.
- [13] Sidenko V.M. *Standartizatsiya i kontrol' kachestva v dorozhnom stroitel'stve* [Standardization and quality control in road construction]. Kyiv: Higher School, 1985, 256 p.
- [14] Nikitin V.V., Kozlov D.G., Skrypnikov A.A., Bryukhovetskiy A.N., Vikulin I.A., Zlobina N.I., Sapelkin R.S. *Metodicheskiy podkhod k raschetu udel'nykh zatrat pri stroitel'stve lesovoznykh dorog* [Methodical approach to the calculation of unit costs in the construction of logging roads]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny* [Stroitelnye i dorozhnye mashiny], 2021, no. 12, pp. 50–54.
- [15] Nikitin V.V., Denisenko V.V., Skrypnikov A.V., Bryukhovetskiy A.N., Tikhomirov P.V., Kozlov D.G., Sapelkin R.S., Prokopets V.S. *Metodika razrabotki normativov dlya proektirovaniya lesotransportnykh setey* [Methodology for the development of standards for the design of forest transport networks]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny* [Construction and road machines], 2021, no. 12, pp. 45–49.
- [16] Prokopets V.S., Skrypnikov A.A., Kozlov D.G., Tikhomirov P.V., Bukreev V.Yu., Kazachek M.N. *Metodika provedeniya obsledovaniya ekspluatatsionnogo sostoyaniya lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Methodology for conducting a survey of the operational state of logging roads]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny* [Construction and road machines], 2022, no. 2, pp. 51–54.
- [17] Timofeev V.A., Tikhomirov P.V., Kozlov D.G., Tveritnev O.N., Skrypnikov A.A., Borovlev Yu.A., Shcherbakov E.D., Kazachek M.N., Zhuk A.Yu. *Issledovanie sostoyaniy podsistemy posledovatel'nogo analiza lesovoznykh avtomobil'nykh dorog s prognozirovaniem ob'ema kontrol'no-priemochnykh izmereniy na osnove teorii Markovskikh sluchaynykh protsessov* [Investigation of the states of the subsystem of sequential analysis of logging roads with forecasting the volume of control and acceptance measurements based on the theory of Markov random processes]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Sistemy. Methods. Technologies], 2022, no. 3(55), pp. 146–151.
- [18] Kozlov D.G. *Analiz vidov i naznacheniy vedomstvennykh dorog* [Analysis of the types and purposes of departmental roads]. *Teoriya i praktika innovatsionnykh tekhnologiy v APK: materialy natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Theory and practice of innovative technologies in the agro-industrial complex: materials of the national scientific and practical conference], Voronezh, April 19–21, 2022. Voronezh: Voronezh State Agrarian University, 2022, pp. 336–342.
- [19] Kozlov D.G. *Tekhnologicheskie osobennosti avtomobil'nykh lesovoznykh dorog* [Technological features of logging roads]. *Teoriya i praktika innovatsionnykh tekhnologiy v APK: materialy natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Theory and practice of innovative technologies in the agro-industrial complex: materials of the national scientific and practical conference], Voronezh, April 19–21, 2022. Voronezh: Voronezh State Agrarian University, 2022, pp. 343–349.
- [20] Bondarev A.B., Kozlov D.G. *Obsledovanie ekspluatatsionnogo sostoyaniya lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Survey of the operational state of logging roads]. *Energoeffektivnost' i energosberezhenie v sovremennom proizvodstve i obshchestve: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Energy efficiency and energy saving in modern production and society: materials of the international scientific and practical conference], Voronezh, June 06–07, 2022. Voronezh: Voronezh State Agrarian University, 2022, pp. 196–200.
- [21] Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Samtsov V.V., Nikitin V.V., Boltnev D.E., Borovlev A.O. Influence of natural and technogenic factors on the complexity of construction of timber highways. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Zernograd, Rostov Region, 27–28 августа 2020 года). Zernograd, Rostov Region: IOP Publishing Ltd, 2021, p. 012137.
- [22] Zelikov V.A., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Samtsov V.V., Tikhomirov P.V., Borovlev A.O. Structural Models of Road Landscapes and Microlandscapes. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Zernograd, Rostov Region, 27–28 августа 2020 года). Zernograd, Rostov Region: IOP Publishing Ltd, 2021, p. 012116.

- [23] Borovlev A.O., Skrypnikov A.V., Vysotskaya I.A., Bryukhovetskiy A.N., Nikitin V.V. *Sochetaniya krivolineynykh uchastkov plana i prodol'nogo profilya trassy lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Combinations of curvilinear sections of the plan and the longitudinal profile of the route of logging roads]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [News of the St. Petersburg Forestry Academy], 2021, no. 235, pp. 19–207.
- [24] Zhuk A.Yu., Sablin S.Yu., Skrypnikov A.V., Boltnev D.E., Vysotskaya I.A. *Issledovanie matematicheskoy modeli rel'efa mestnosti pri proektirovanii avtomobil'nykh dorog* [Investigation of the mathematical model of the terrain in the design of highways]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2021, no. 2(50), pp. 88–93.
- [25] Popov V.N., Vasilenko V.N., Khvostov V.A., Denisenko V.V., Skrypnikov A.V., Ivanov A.V., Belyaev A.N., Stukalo O.G. Security threats to personal data in the implementation of distance educational services using mobile technologies. *J. of Theoretical and Applied Information Technology*, 2021, v. 99, no. 15, pp. 3935–3946.

Authors' information

Bryukhovetskiy Andrey Nikolaevich — Cand. Sci. (Tech.), Voronezh State University of Engineering Technologies, bruhoveckiy@rambler.ru

Skrypnikov Aleksey Vasil'evich — Dr. Sci. (Tech.), Dean of the faculty of Management and computer science in technological systems, of the Voronezh State University of Engineering Technologies, skrypnikovvsafe@mail.ru

Kozlov Dmitry Gennadievich✉ — Cand. Sci. (Tech.), Deputy Dean for Employment of the Faculty of Agricultural Engineering, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, dimvsau@mail.ru

Romanov Pavel Olegovich — External, Voronezh State University of Engineering Technologies, romanov_pa@yandex.ru

Boikov Pavel Aleksandrovich — External, Voronezh State University of Engineering Technologies, pboy-kov23@mail.ru

Kazachek Maria Nikolaevna — Candidate of the Department of Information Security, Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov, kazachekmaria@yandex.ru

Received 17.01.2023.

Approved after review 03.07.2023.

Accepted for publication 23.08.2023.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

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

The authors declare that there is no conflict of interest

ГРАБЛИ ЛЕСНЫЕ: НАЗНАЧЕНИЕ, ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ, КЛАССИФИКАЦИЯ

А.А. Платонов

ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», Россия, 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2

raa7@rambler.ru

Рассмотрено современное состояние технических средств механизации сбора и сгребания порубочных остатков в России и в мире. Рекомендовано обозначать указанные технические средства как «грабли лесные», обосновано их определение и выявлена область применения. Раскрыты качественные характеристики грабель лесных, в частности ширина захвата, количество и ширина рабочих элементов (зубьев). Установлено, что около 50 % моделей грабель лесных, выпускаемых отечественной и зарубежной промышленностью, имеют ширину зубьев в диапазоне 19...32 мм, ширину захвата 1000...2000 мм ($\approx 51\%$), около 25 % всех моделей грабель лесных обладают количеством зубьев — 5 или 6, а более 58 % — количеством зубьев 5...9. Впервые разработана классификация грабель лесных, предусматривающая три первичных классификационных признака с наибольшим уровнем иерархии полученного классификационного дерева, равным 6. Представленные результаты могут быть использованы производственными предприятиями, занимающимися содержанием и эксплуатацией территорий различных объектов.

Ключевые слова: нежелательная растительность, удаление, средства механизации, лесные грабли, классификация, характеристики

Ссылка для цитирования: Платонов А.А. Грабли лесные: назначение, область применения, классификация // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 6. С. 139–150. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-139-150

В рамках надлежащего содержания различных инфраструктурных объектов [1, 2] с определенной периодичностью [3] осуществляются работы по удалению с их территорий нежелательной древесно-кустарниковой растительности (НДКР). Особенностью такого вида работ является то, что в ряде соответствующих технологических процессов [4, 5] предусмотрена технологическая операция сбора и сгребания срезанной (срубленной или лишенной связи с почвой иным способом) указанной растительности. Не принимая во внимание ручной способ выполнения подобных работ, отдельное внимание, на наш взгляд, следует уделить таким техническим средствам механизации указанной операции, как грабли.

Накоплен большой практический опыт по использованию грабель, как в сельском, так и в лесном хозяйстве, однако публикаций на эту тему не так много, а имеющийся материал (например [6]) в большей степени посвящен применению грабель в сельском хозяйстве ($\approx 95\%$, запрос в названии — «грабли», тип публикации — «книги, статьи в журналах, материалы конференций», тематика — «сельское и лесное хозяйство», годы публикации 2000–2022 гг., электронная библиотека eLibrary.ru, ноябрь 2022 г.). О лесном хозяйстве в России и за рубежом издаются книги, публикуются монографии, обзоры и статьи [7–9],

в которых вопросам сбора и сгребания порубочных остатков посвящены лишь отдельные абзацы (максимум — отдельные параграфы в главах).

Традиционными средствами удаления порубочных остатков в России служили так называемые кустарниковые грабли, предназначенные для сгребания в кучи срезанного и выкорчеванного кустарника, мелкоколосья, пней диаметром до 15 см (рис. 1, а) и агрегатируемые с тракторами класса тяги 6,0 (рис. 1, б).

Кроме них для механизированной очистки территорий от порубочных остатков применялся подборщик сучьев ПСГ-2.4, предназначенный для работ на вырубках с количеством пней до 600 шт. на 1 га (рис. 1, в), подборщики ПС-2.4, ПС-2Г, ПС-5, ЛТ-161 и др. [8, 10]. Однако, как отмечалось в работе [11], указанные машины для сбора порубочных остатков были созданы на базе трелевочных тракторов еще в 1960-х годах, что, на наш взгляд, обуславливает нынешний не только моральный, но и физический износ сохранившихся экземпляров подобной техники. При этом очистка территории некоторых инфраструктурных объектов нередко выполняется в рамках аутсорсинга [12, 13] подрядными организациями, которые стремятся содержать на своем балансе современные средства механизации удаления НДКР [14]. Исходя из этого нами был осуществлен поиск информации, показавший, что большинство из приведенных традиционно применявшихся в России технических средств

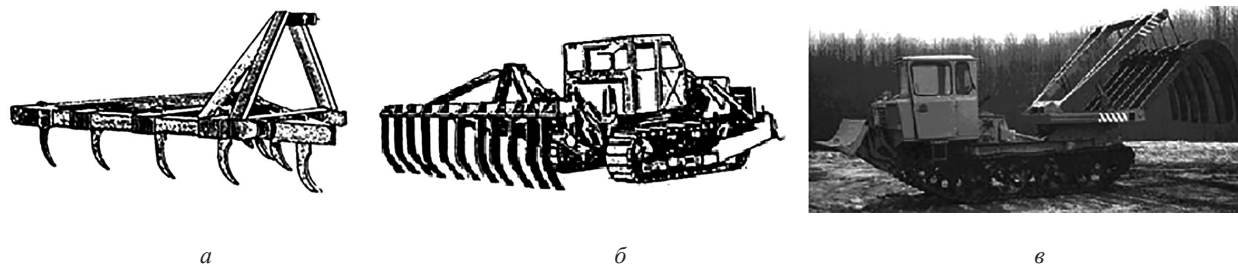


Рис. 1. Традиционные средства сгребания порубочных остатков
 Fig. 1. Traditional raking tools for groundwood

механизации сбора и сгребания порубочных остатков снято с производства.

Имеющиеся публикации об очистке различных территорий от НДКР нередко ограничиваются [15, 16] лишь описанием технико-экономических характеристик отдельных машин и механизмов [17–19], в том числе — применительно к конкретной технологии применения устройств сбора и сгребания срезанной (вырубленной) НДКР [20, 21]. Аналогично узкую направленность имеют зарубежные исследования в области очистки территорий от нежелательной древесно-кустарниковой растительности. Так, авторами из Канады [22] было изучено влияние удаления порубочных остатков при одновременном уплотнении почвы на рост лесных культур, качество почвы и общую продуктивность леса. Коллектив ученых из Италии [23] исследовал результаты оценки количества остатков лесной биомассы, которые не следует убирать с территории для сведения к минимуму истощения плодородия почвы. В работе [24] рассмотрено влияние промышленного сбора малоликвидных порубочных остатков (вершин, веток и пней от вырубленных деревьев и кустарников) на биоразнообразие лесной экосистемы. В работе [25] австралийские ученые изложили результаты исследования влияния прореживания лесных культур с оставлением порубочных остатков на структурные характеристики лесного массива в районах с низким количеством осадков.

Таким образом, нами установлено, что масштабные исследования современных технических средств сбора и сгребания порубочных остатков НДКР не проводили. В частности, не классифицированы рассматриваемые технические средства, отсутствует обоснование их качественных характеристик, не выявлены количественные. Кроме того, нет их общепринятого названия и определения, что затрудняет процесс организации работ по удалению НДКР с некоторых территорий ввиду их зачастую фактического несоответствия современным направлениям развития машин и механизмов в области сбора и сгребания порубочных остатков.

Цель работы

Цель работы — обобщение качественных и количественных характеристик технических средств сбора и сгребания порубочных остатков нежелательной древесно-кустарниковой растительности с разработкой их классификации для повышения эффективности организации работ по удалению указанной растительности.

Материалы и методы

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) выполнить обзор отечественных и зарубежных средств механизации сбора и сгребания порубочных остатков с установлением конструктивных и технологических параметров их работы;
- 2) разработать классификацию технических средств сбора и сгребания НДКР с обоснованием области ее применения.

Объектом исследования служило содержание некоторых инфраструктурных объектов, в частности полос отвода железных и автомобильных дорог, газопроводов, нефтепроводов, высоковольтных линий электропередач, а также иных территорий, предметом — технологические процессы удаления НДКР с территорий указанных инфраструктурных объектов и средства механизации, применяемые при выполнении соответствующих технологических операций.

Для осуществления исследований использовали следующие исходные материалы:

- актуальные базы данных результатов проведения конкурсов по выполнению очистки территорий от НДКР — изучено более 8100 конкурсных заявок начиная с 2012 г.;
- аналитические обзоры, посвященные состоянию технических средств механизации работ по удалению НДКР с территорий некоторых объектов;
- нормативно-методические документы организаций, ответственных за содержание указанных инфраструктурных объектов;
- каталоги технических средств сбора и сгребания порубочных остатков НДКР, размещенные

на официальных сайтах производителей рассматриваемой техники;

– научные разработки по тематике исследований, находящиеся в открытом доступе, и др.

В качестве методической основы применялся комплекс научных методов: аналитический исторический анализ общих закономерностей развития рассматриваемых технических средств в хронологическом порядке, системный анализ характеристики средств механизации сбора и сгребания порубочных остатков НДКР, математическая статистика для оценки достоверности полученных результатов.

Поиск перечисленных исходных материалов проводился в библиографической базе данных Scopus, научной электронной библиотеке eLIBRARY, а также на официальном сайте единого информационного пространства всей сферы государственных закупок в России. Поиск запросы (с глубиной поиска от 1980 г.) по теме исследования были сформированы с использованием ключевых дескрипторов на русском, английском, шведском, финском и французском языках.

Результаты и обсуждение

Анализ материалов позволил установить, что на территории России при удалении НДКР применяются такие современные технические средства механизации для сгребания порубочных остатков, как грабли лесные, грабли уборочные лесные, оборудование уборочное лесохозяйственное, сгребатель веток леса, толкатель для расчистки лесосек, изготавливаемые отечественными (российскими) и отнесенными нами к этой же категории белорусскими) производителями. В целом обращает на себя внимание преимущественное наличие в наименовании указанных технических средств слова «грабли» как стремление производителей уже в самом наименовании отмечать их предназначение, а также присутствие характеризующего их признака, связанного с лесом — лесные, лесохозяйственные и т. д.

Анализ наименований соответствующих технических средств зарубежных производителей показал преимущественное наличие слова «Rake» («грабли», пер. с англ.). Однако при этом более широко, чем в отечественной промышленности, представлены характеризующие их признаки: «forest» (лесные), «brush» (кистевые, щеточные), «goot» (корневые), «dozer» (бульдозерные, с креплением на отвале), «excavator» (экскаваторные, с креплением на рукояти) и т.д. Следует отметить, что характеризующий признак «shrub» (кустарниковые) встречается для граблей в современной англоязычной литературе в понятии «ручные грабли для ухода за кустарниками». С учетом этого и ввиду выявленной распространенности

такого наименования технических средств по сгребанию НДКР, как «грабли» и характеризующего их связанного с лесом признака («лесные»), нам представляется целесообразным рекомендовать для введения в практику организации работ по удалению нежелательной древесно-кустарниковой растительности обозначать рассматриваемые технические средства как «грабли лесные».

Несмотря на фактическую распространенность в отечественном и зарубежном машиностроении средств механизации сбора и сгребания нежелательной растительности с рекомендуемым выше названием, с помощью осуществленного нами информационного поиска по многочисленным (энциклопедическим, толковым, лесным и т. д.) словарям и технической литературе, посвященной данной тематике, в том числе нормативным документам, было выявлено отсутствие определения того, что именно следует считать техническим средством с наименованием «грабли лесные». При этом нами было установлено, что назначение и область применения технических средств, которые издавна предназначены лишь для сгребания порубочных остатков от НДКР, уже давно и далеко вышли за традиционные пределы сферы воздействия на указанную растительность. В настоящее время в зависимости от назначения, вида базовой машины, а также конструктивных особенностей граблей лесных существуют следующие области их применения:

- уход за лесным фондом (в том числе за молодыми культурами);
- расчистка полос отвода автомобильных и железных дорог, трасс газо-, нефте- и продуктопроводов, высоковольтных линий электропередачи, водоводов, пограничных просек, откосов и поверхностей каналов и плотин, побережий и русел рек, иных территорий;
- выполнение противопожарных мероприятий на некоторых территориях.

Назначение граблей лесных заключается в выполнении следующих работ:

- по сбору и/или сгребанию порубочных остатков, в том числе корней нежелательной древесно-кустарниковой растительности;
- корчеванию небольших пней с корнями;
- погрузке НДКР (в том числе ее порубочных остатков) на/в последующие машины (транспортировка, измельчение в щепу).

По нашему мнению, в определении данного технического средства должны быть отражены его характеристики как оборудования, предназначенного для выполнения специальных целей (с указанием конкретных целей), а также сведения о территориях их преимущественного применения. Исходя из этого, предлагаем для введения в практику организации работ по удалению НДКР

следующее определение рассматриваемого технического средства: грабли лесные — это специализированное оборудование, предназначенное для сбора и/или сгребания неизмельченных порубочных остатков на территориях, подлежащих очистке от древесно-кустарниковой растительности.

Современная мировая промышленность выпускает разнообразные технические средства сбора и сгребания порубочных остатков, которые можно идентифицировать в соответствии с ГОСТ 29008–91 (ISO 6814:2009) в зависимости от их принадлежности к основным типам по характерным операциям или сочетаниям выполняемых ими операций, а также по ряду конструктивных признаков, определяющих в целом их качественные и количественные характеристики.

К качественным характеристикам граблей лесных, непосредственно влияющим на выполнение ими своих основных функций, определяющим их понятность и сравнимость для пользователей (эксплуатирующих организаций), а также существенность применения, целесообразно отнести такие конструктивные параметры граблей лесных, как ширину захвата B_R , количество Z и ширину B_Z их рабочих элементов (зубьев). Указанные характеристики прямым (как ширина захвата B_R) или опосредованным образом влияют на теоретическую производительность работы W_R (га/ч) граблей лесных, в самом общем случае определяемой по формуле

$$W_R = 0,1 \cdot B_R \cdot V_a \cdot \eta_R,$$

где B_R — ширина захвата граблей лесных, м;

V_a — поступательная скорость перемещения граблей лесных, км/ч;

η_R — коэффициент использования ширины захвата граблей лесных при сборе и/или сгребании порубочных остатков.

В результате анализа более 200 моделей граблей лесных, выпускаемых отечественными (российскими, а также отнесенными нами к этой же категории белорусскими) и зарубежными производителями были определены следующие их количественные характеристики: ширина захвата B_R , количество Z и ширина B_Z рабочих элементов (зубьев, принятых по наибольшему размеру соответствующего профиля рабочей поверхности) рассматриваемых технических средств, статистические количественные показатели центра распределения которых приведены на рис. 2.

Коэффициенты вариации ширины захвата ($v = 41,84\%$), количества зубьев ($v = 58,24\%$) и ширины зубьев ($v = 39,71\%$) находятся в пределах 30...70% (умеренная вариация). Для выборочных данных ширины захвата значения коэффициента асимметрии $A_s = 0,568$ и эксцесса $E_x = -0,34$ мало отличаются от нуля, поэтому можно предполо-

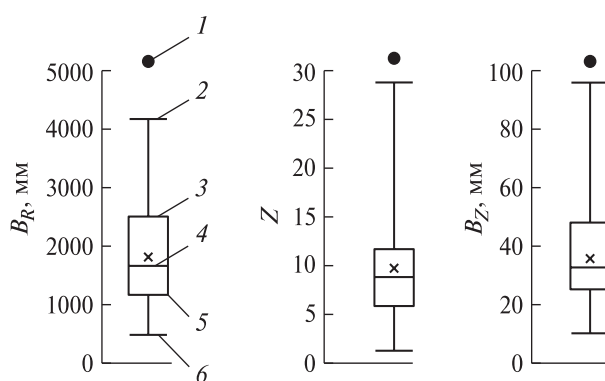


Рис. 2. Показатели центра распределения характеристик граблей лесных: 1 — выброс; 2 — max. значение; 3 — верхний квартиль; 4 — медиана; 5 — нижний квартиль; 6 — min. значение

Fig. 2. Center distribution of forest rake characteristics: 1 — outlier; 2 — max. value; 3 — upper quartile; 4 — median; 5 — lower quartile; 6 — min. value

жить близость данной выборки к нормальному распределению. Проверка гипотезы о нормальном распределении показателя B_R по критерию согласия Пирсона ($K_{набл} = 11,07 < K_{кр} = 15,85$) показала, что нет оснований отвергать данную гипотезу. С вероятностью 0,95 можно утверждать, что среднее значение ширины захвата B_R граблей лесных при выборке большего объема не выйдет за пределы доверительного интервала 1685,031...1943,436.

В целом отечественные производители осуществляют выпуск преимущественно граблей лесных, агрегируемых с тракторами общего (в редких случаях — лесохозяйственного) назначения (с мощностью двигателя 60(81)...96(130) кВт(л.с.)), которые позволяют выполнять лишь сгребание порубочных остатков. При этом для указанных технических средств отмечены некоторые общие черты, а именно: крепление на переднюю/заднюю навеску трактора и традиционный (выполненный по дуге) профиль рабочих элементов (например, МТЗ Горыныч Т15, Россия; рис. 3, а).

Некоторые белорусские производители технических средств по сгребанию НДКР (ООО «Иноватек», «ИНТАТЕХГРУП», «МТЗ-ХОЛДИНГ», ООО «Евромаш», «Техмаш») выпускают, на наш взгляд, фактически идентичные по назначению и области применения грабли лесные. Их конструктивные (ширина захвата 2300...2500 мм, ломаный профиль — пять рабочих элементов) и кинематические (с предохранительными устройствами) особенности позволяют осуществлять формирование валов и куч из порубочных остатков без повреждения верхнего слоя почвы и при свободном преодолении препятствий в виде камней и/или пней высотой до 230...380 мм (напри-



Рис. 3. Примеры характерных технических средств сбора и сгребания нежелательной древесно-кустарниковой растительности
Fig. 3. Examples of typical technical means for collecting and raking unwanted tree and shrub vegetation

мер, устройство ЗПИ производство «Инноватек», см. рис. 3, б; EM-2200, производство «Евромаш» [26], рис. 3, в).

Дополнительно констатируем, что российские и белорусские производители выпускают ограниченное (около 10) количество моделей граблей лесных, среди которых можно отметить лесные грабли ЛГ 82/2 (Россия) с наименьшим (среди всех выявленных нами в данном исследовании) количеством рабочих элементов (зубьев) $Z = 2$.

Отдельное внимание следует уделить граблям лесным зарубежного производства. Выполненным исследованиями было определено, что производители ряда стран (Advanced Forest Equipment Inc., Bedrock Machinery, Caterpillar Inc., Dymax Inc., East Attachments, Fleco Attachments, Jenkins Iron & Steel, K&A Fabrication, Kenco, Leading Edge Attachments Inc., Lowy Manufacturing Inc. Ransome, Solesbee, Steel Unlimited Inc., TAG Manufacturing Inc., Wallace Attachments, США; Digga, Gardner Engineering, Homan, Norm Engineering, Австралия; A. Hirvonen Oy, Aqua-

mec Ltd, Финляндия; WesttecH Maschinenbau GmbH, Австрия; Keen Attachments Ltd, JF Hudson Ltd, Великобритания; GRT Hire, Ирландия; Gryb, Nye Manufacturing Ltd., TRK Attachments Inc., Weldco-Beales Manufacturing, Канада; Yantai Jiangtu, Китай; Fravizel Engineering, Португалия; Erdvark Engineering, ЮАР) выпускают грабли лесные, агрегируемые как с тракторами, так и с многофункциональными машинами (в том числе погрузчиками и мини-погрузчиками, а также специализированными шасси).

В частности, выявлено, что при установке граблей лесных на многофункциональных машинах на базе шасси «экскаватора» (с закреплением рассматриваемых средств механизации на конце рукояти стрелы-манипулятора) особенностью технических средств сбора и сгребания нежелательной растительности является переменное (по длине) сечение зубьев, а также нередкое применение сменных наконечников зубьев. В качестве примера отметим выпускаемые компанией Leading Edge Attachments Inc. (для многофункциональных

машин массой 4...80 т) «линейку» грабель лесных Fang Rake [27] с интервалом габаритных размеров (ширина×длина, при этом длина измеряется от центра оси стержня до конца рабочего элемента-зуба) 750×800...1450×2100 мм и массой 145...2685 кг (рис. 3, з), а также производимые компанией Fravizel Engineering для многофункциональных машин массой 7...32 т лесные грабли Forest Rake массой 70...1400 кг различной ширины захвата и количества зубьев (рис. 3, д).

Кроме традиционного (выполненного по дуге) профиля рабочих элементов (например, грабли Series II Stacking Rake компании Wallace Attachments с длинными изогнутыми зубьями, облегчающими сгребание и последующую транспортировку удаляемой растительности) был отмечен ряд грабель лесных, форма зубьев которых позволяет использовать их как в тянущем, так и в толкающем движениях (фактически они универсальные по направлению воздействия). Так, австралийской компанией Digga предлагаются грабли лесные Digga Stick Rake (рис. 3, е), предназначенные для быстрой уборки порубочных остатков с возможностью одновременного просеивания почвы и/или камней [28].

Отдельно выделим быстростъемные лесные грабли, которые можно устанавливать на многофункциональные машины различных типов через специальные адаптеры, обеспечивая таким образом стремительное (фактически нередко в пределах 5...10 с), легкое (участие человека-оператора ограничивается дистанционным управлением органами многофункциональной машины) и эффективное закрепление грабель лесных (например, «линейка» моделей накладных грабель Kenco Dozer Brush Rake [29] с шириной захвата 2400...3600 мм; рис. 3, ж).

Многими зарубежными компаниями (Dymax Inc, K&A Fabrication, WesttecH Maschinenbau GmbH, A. Hirvonen Oy, Keen Attachments Ltd, Advanced Forest Equipment Inc. и др.) предлагаются грабли лесные, снабженные одной или несколькими дополнительными захватно-прижимными лапами, управляемыми совместно или раздельно друг от друга и агрегируемых с многоцелевыми погрузчиками (например, «линейка» моделей грабель лесных Ransome Loader Stacking Rake, шириной захвата 1950...3000 мм и массой 340...920 кг; рис. 3, з) или многофункциональными машинами (например, Fravizel Grab Bucket Excavator, шириной захвата 1200...2500 мм и массой 1200...3500 кг; рис. 3, и). Указанное конструктивное решение позволяет повысить эффективность сгребания нежелательной растительности при одновременной (или отложенной по времени) возможностью ее сбора и погрузки в кузов транспортного средства.

Для более тщательной очистки территории от нежелательной растительности некоторые компании предлагают дополнительное навесное оборудование, агрегируемое с основными граблями лесными. В частности, компанией WesttecH Maschinenbau GmbH (Австрия) в дополнение к граблям Clearing Rake Woodcracker G (шириной захвата 850...1650 мм, массой 585...1610 кг, агрегируемых с многофункциональными машинами массой 7,5...25 т) осуществляется выпуск лесной щетки (рис. 3, к), навешиваемой на зубья вышеозначенных грабель и позволяющей сгребать тонкомерную поросль [30].

Кроме навесных грабель, зарубежными производителями предлагаются и прицепные грабли, агрегируемые как с тракторами общего, так и специального назначения (например, четырехсекционные Fravizel Brush Rake [31], рис. 3, л). Однако нами установлено сравнительно небольшое количество коммерческих предложений прицепных средств механизации для удаления порубочных остатков НДКР.

Выполненный обзор технических средств сбора и сгребания порубочных остатков нежелательной древесно-кустарниковой растительности позволил определить полигоны эмпирических частот по ширине зубьев $f_{ib_z} = B_z / \bar{B}_z$ (рис. 4, а), ширине захвата $f_{ib_r} = B_r / \bar{B}_r$ (рис. 4, б) и количеству зубьев $f_{iz} = Z / \bar{Z}$ (рис. 4, в). Анализ указанных полигонов, сформированных относительно общего количества принятых в исследование моделей грабель лесных по соответствующим их параметрам (для ширины зубьев \bar{B}_z , ширины захвата \bar{B}_r , количества зубьев \bar{Z}), показал следующее.

Во многом ширина зубьев грабель лесных кратна дюймовой (1 дюйм = 25,4 мм), а не метрической системе измерений, что объясняется распространенностью исследуемых технических средств в зарубежных (в первую очередь англоязычных) странах. Около 22 % моделей грабель лесных имеют ширину зубьев $B_z = 1'' = 25,4$ мм, около 19 % — $B_z = 1,25'' = 31,75$ мм и около 5 % — $B_z = 0,75'' = 19,05$ мм. С учетом «российского» размера $B_z = 20$ мм (≈ 5 %) можно отметить, что около 50 % моделей грабель лесных, выпускаемых отечественной и зарубежной промышленностью, имеют ширину зубьев в диапазоне $B_z = 19...32$ мм. Вполне логичным и объяснимым удобством применения в стесненных лесных условиях признано распространение грабель лесных с шириной захвата $B_r = 1000...2000$ мм (≈ 51 %), однако обращает на себя внимание востребованность как узких ($B_r \leq 1000$ мм; ≈ 10 % всех моделей), так и широких ($B_r > 3000$ мм; ≈ 12 %) грабель лесных. Учитывая возможность работы исследуемых технических средств в

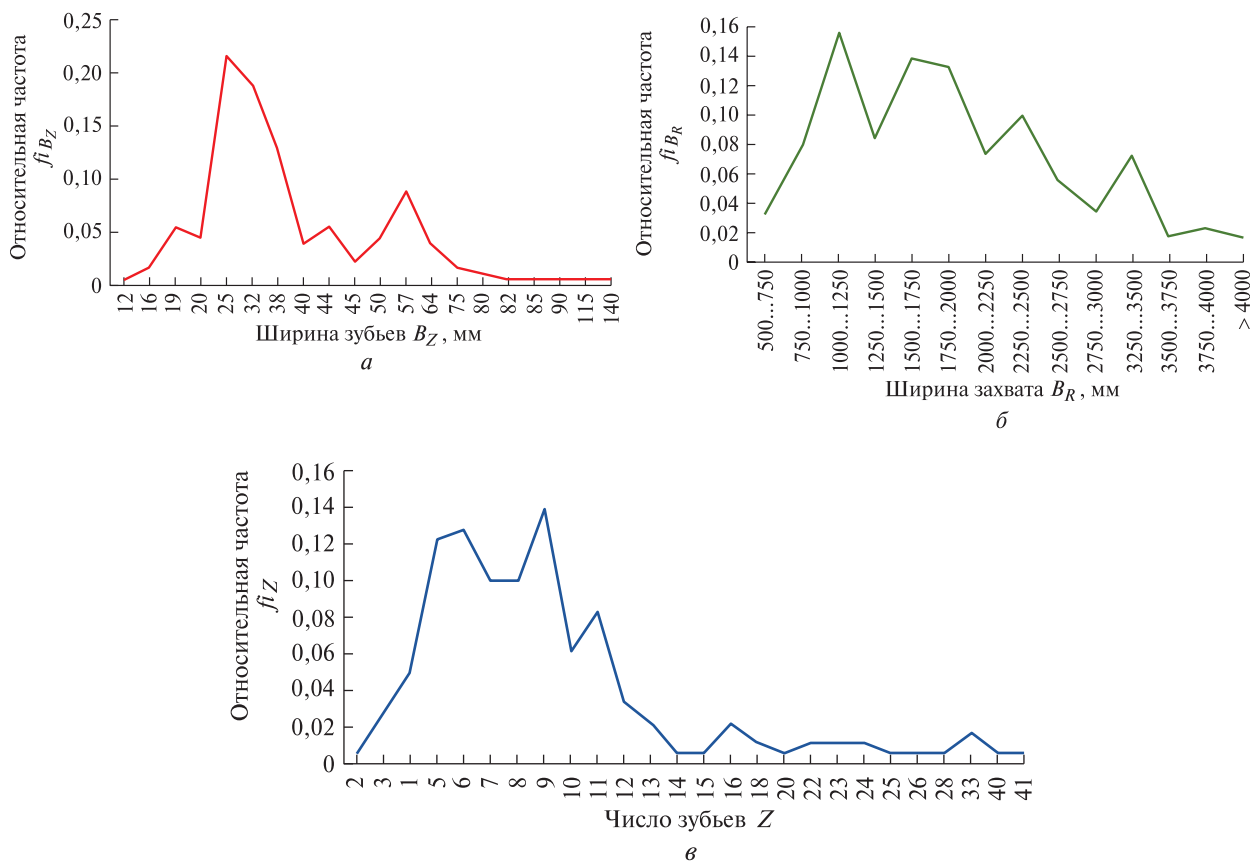


Рис. 4. Полигоны эмпирических частот основных конструктивных параметров граблей лесных: *a* — по ширине зубьев; *б* — по ширине захвата; *в* — по количеству зубьев

Fig. 4. Polygons of empirical frequencies of the main design parameters of forest rakes: *a* — along the width of the teeth; *б* — along the working width; *в* — by number of teeth

ограниченном для их маневров пространстве, только около 25 % всех моделей граблей лесных обладают количеством зубьев $Z = 5$ или $Z = 6$, а у более 58 % — $Z = 5 \dots 9$.

В целом на общую конструкцию граблей лесных и, как следствие, на возможность выполнения ими объема работ требуемого содержания и надлежащего качества влияют группы параметров, связанных как с конструктивно-технологическими характеристиками рассматриваемых граблей, так и базовых транспортных средств, а также с различными факторами окружающей среды (в том числе — характеристиками территории, подлежащей очистке).

Однако при этом в рамках данного исследования выявлено отсутствие классификации рассматриваемых технических средств, которая бы:

- позволила структурировать все разнообразие технических средств сбора и сгребания нежелательной растительности;

- была полезной при их выборе и назначении для осуществления работ по очистке территорий от НДКР;

- предоставила возможность индивидуальной идентификации отдельных экземпляров таких технических средств;

- обеспечила эффективный поиск направлений перспективного развития машин и оборудования для расчистки лесных земель.

Таким образом, исходя из проведенного анализа и на основании полученных данных нами была разработана классификация граблей лесных (рис. 5), принимая во внимание, что более целесообразна классификация по конструктивно-технологическим параметрам, что обусловлено широким многообразием форм применения данных технических средств, в свою очередь предопределяющим очень разветвленную классификационную структуру, которая усложнит анализ и создаст трудности при обобщении имеющихся признаков. При классифицировании рассматриваемых технических средств были выделено три первичных классификационных признака, семь вторичных, пять классификационных признаков третьего уровня, два — четвертого уровня и 36 классификационных рядов (с учетом

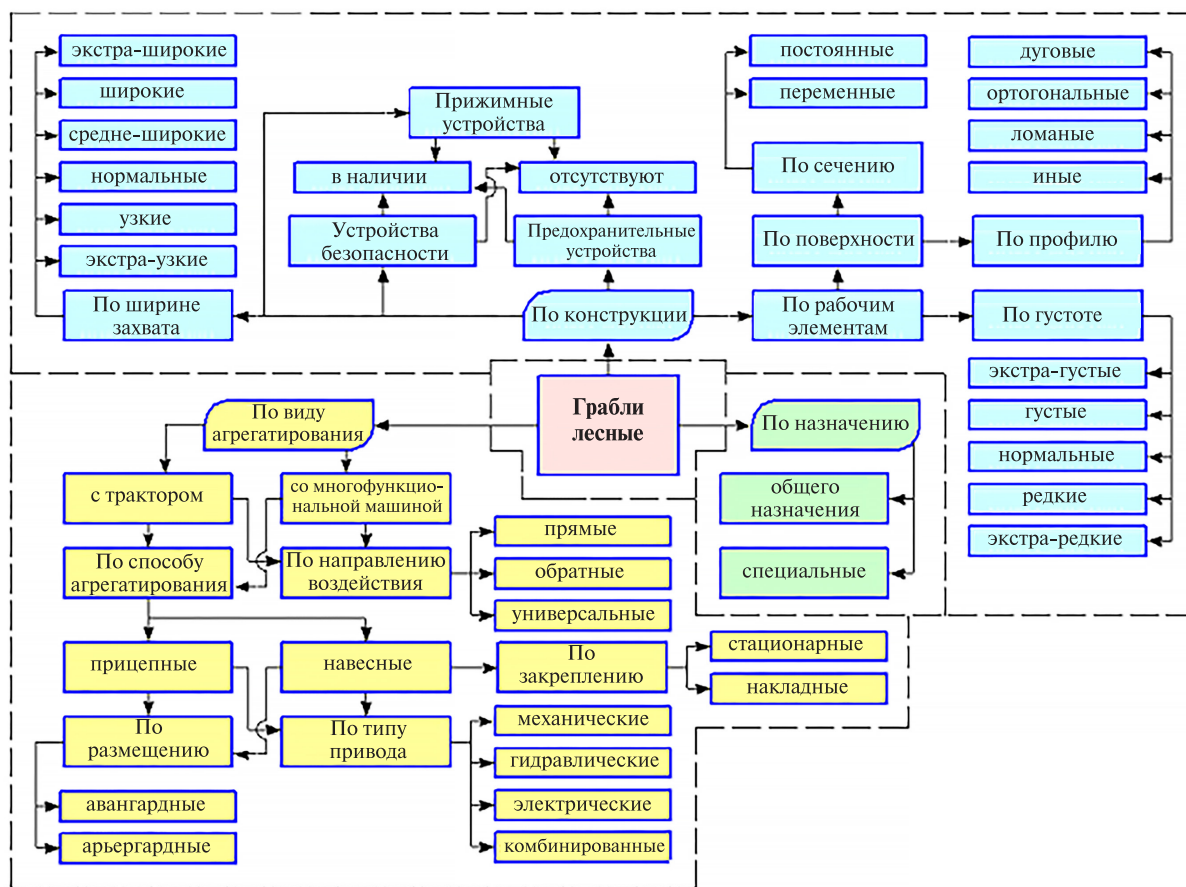


Рис. 5. Классификация граблей лесных
 Fig. 5. Forest rake classification

эффекта фасетной структуры). Наибольший уровень иерархии полученной классификационной структуры оказался равным шести.

В качестве примера приведем следующую классификацию некоторых рассмотренных отечественных и зарубежных граблей лесных:

– МТЗ Горыныч Г15 (Россия, см. рис. 3, а): навесные, стационарные, авангардные по размещению, нормальные по ширине, редкие по густоте лесные грабли общего назначения, агрегируемые с трактором, гидравлического привода, прямого воздействия, с дугвым профилем переменного сечения поверхности зубьев;

– Digga Stick Rake (Австралия, см. рис. 3, е): навесные, стационарные, средне-широкие, густые грабли лесные общего назначения, агрегируемые с многофункциональной машиной, гидравлического привода, универсального воздействия, с дугвым профилем постоянного сечения поверхности зубьев;

– Clearing Rake Woodcracker G1250 (Австрия, см. рис. 3, к): навесные, стационарные, нормальные по ширине и густоте грабли лесные общего назначения, агрегируемые с многофункциональной машиной, гидравлического привода,

обратного воздействия, с ортогональным профилем переменного сечения поверхности зубьев и наличием прижимных устройств;

– Fravizel Brush Rake (Португалия, см. рис. 3, л): прицепные, стационарные, арьергардные по размещению, средне-широкие, густые грабли лесные общего назначения, агрегируемые с трактором, гидравлического привода, обратного воздействия, с дугвым профилем переменного сечения поверхности зубьев.

Предложенная классификация граблей лесных позволяет систематизировать выпускаемые ныне (а также произведенные ранее и перспективные) технические средства сбора и сгребания порубочных остатков НДКР по многочисленным признакам, связанным как с параметрами рассматриваемых средств механизации, так и с параметрами базовых транспортных средств, а также с окружающей средой. При организации работ по удалению указанной растительности предприятия и организации, ответственные за надлежащее содержание территорий различных объектов, смогут обоснованно назначать модели граблей лесных, оптимально подходящих к конкретным условиям их при-

менения. На основе разработанной классификации грабель лесных возможно создание базы данных имеющихся конструктивных решений технических средств сбора и сгребания порубочных остатков, разработок и математических моделей соответствующих рабочих процессов НДКР с территориями инфраструктурных объектов.

Выводы

1. Удаление порубочных остатков нежелательной древесно-кустарниковой растительности с различных территорий традиционно осуществлялось кустарниковыми граблями, снятыми ныне с производства, при этом масштабных исследований современных технических средств сбора и сгребания порубочных остатков до настоящего времени не проводилось.

2. Для введения в практику организации работ по удалению НДКР рекомендовано относить технические средства по сбору и сгребанию порубочных остатков к категории «грабли лесные». Обосновано их определение и выявлена область применения.

3. Качественными характеристиками грабель лесных являются ширина захвата, количество и ширина рабочих элементов (зубьев).

4. Отечественная промышленность выпускает ограниченное (лишь около 10) количество моделей грабель лесных.

5. Около 50 % моделей грабель лесных, выпускаемых отечественной и зарубежной промышленностью, имеют ширину зубьев в диапазоне $B_z = 19 \dots 32$ мм, ширину захвата $B_R = 1000 \dots 2000$ мм (≈ 51 %), около 25 % всех моделей грабель лесных обладают количеством зубьев $Z = 5$ или $Z = 6$, а у более чем 58 % — $Z = 5 \dots 9$.

6. Впервые разработанная классификация технических средств сбора и сгребания порубочных остатков, выполненная по принципу иерархии, предусматривает несколько первичных классификационных признаков, а также 36 классификационных рядов, полученных с учетом эффекта фасетной структуры, при этом наибольший уровень иерархии полученной классификационной структуры составил шесть.

7. Классификация грабель лесных позволяет систематизировать выпускаемые ныне (а также существующие и планируемые к производству) разнообразные технические средства сбора и сгребания порубочных остатков НДКР по многочисленным признакам, предоставляя при этом возможность обоснованного выбора и назначения грабель лесных для осуществления работ по очистке территорий от нежелательной растительности, а также визуализацию направлений перспективного развития машин и оборудования для расчистки лесных земель.

Список литературы

- [1] Абакумов Г.В. Элементы транспортной инфраструктуры. Автомобильные дороги: монография. Тюмень: Изд-во ТюмГНГУ, 2012. 101 с.
- [2] Солодкий А.И., Горев А.Э., Бондарева Э.Д. Транспортная инфраструктура: учебник. М.: Юрайт, 2020. 290 с.
- [3] Apattsev V., Aksenov V., Zavyalov A. Upgrading technological processes of operating the railway infrastructure facilities // MATEC Web of Conferences, 2018, p. 04010. DOI: 10.1051/mateconf/201823904010
- [4] Баргенов И.М., Драпалюк М.В., Казаков В.И. Совершенствование технологий и средств механизации лесовосстановления: монография. М.: ФЛИНТА-Наука, 2013. 208 с.
- [5] Мохирев А.П., Зырянов М.А., Безруких Ю.А. Современные технологии заготовки и переработки древесной биомассы на стадии лесозаготовительного производства. Красноярск: Изд-во СибГТУ, 2015. 73 с.
- [6] Элькин С.Ю., Сафонов В.В., Полупанов И.Т. Оснастка и технология восстановления зубьев поперечных грабель // Научное обозрение, 2011. № 6. С. 32–38.
- [7] Силаев Г.В. Машины и механизмы в лесном и лесопарковом хозяйстве: в 2 ч. Часть 2. М.: Юрайт, 2020. 229 с.
- [8] Пятакин В.И. Технология и машины лесосечных работ / под ред. В.И. Пятакина. СПб.: Изд-во СПбГЛТУ, 2012. 362 с.
- [9] Шегельман И.Р., Скрыпник В.И., Галактионов О.Н. Техническое оснащение современных лесозаготовок. СПб: Изд-во Профи-Информ, 2005. 344 с.
- [10] Винокуров В.Н., Еремин Н.В. Система машин в лесном хозяйстве / под ред. В.Н. Винокурова. М.: Академия, 2004. 320 с.
- [11] Кононович Д.А., Мохов С.П., Симанович В.А. Анализ конструктивных особенностей машин для сбора лесосечных отходов // Труды БГТУ. № 2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность, 2016. № 2 (184). С. 31–35.
- [12] Платонов А.А. Аутсорсинг в области борьбы с нежелательной растительностью на эксплуатационных объектах инфраструктуры // Научное обозрение, 2017. № 8. С. 68–73.
- [13] Распоряжение ОАО «РЖД» от 17 февраля 2010 г. № 334р «Передача на сетевой аутсорсинг работ (услуг) в области защитного лесоразведения, содержания земельных участков полосы отвода и охранных зон, озеленения и благоустройства, борьбы с нежелательной растительностью на эксплуатационных объектах инфраструктуры». URL: <https://jd-doc.ru/2010/fevral-2010/6902-gasporyazhenie-oao-rzhd-ot-17-02-2010-n-334r> (дата обращения 15.07.22).
- [14] Ersson B.T., Platonov A., Zimarin S.V. Analysis of the information content of tenders for the removal of unwanted vegetation. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Forestry Forum «Forest ecosystems as global resource of the biosphere: calls, threats, solutions», 2020, p. 012022. DOI: 10.1088/1755-1315/595/1/012022
- [15] Тикачев В.И. Машины для измельчения древесины // ЛесПромИнформ, 2010. № 2 (68). С. 92–104.
- [16] Тикачев В.И. Мульчеры и измельчители пней // ЛесПромИнформ, 2010. № 4 (70). С. 76–81.
- [17] Ивашев М.В. Научные основы совершенствования машин для удаления древесно-кустарниковой растительности при непрерывном движении базового трактора: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. Петро-заводск, 2019. 36 с.

- [18] Ширнин Ю.А., Рукомойников К.П., Гайсин И.Г., Ширнин А.Ю. Обоснование необходимости развития стратегии технологических процессов лесопользования на лесных плантациях // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 3. С. 49–57. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-3-49-57
- [19] Gerasimov Y., Senko S., Karjalainen T. Prospects of Forest Road Infrastructure Development in Northwest Russia with Proven Nordic Solutions. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2013, vol. 28, no. 8, pp. 758–774. DOI: 10.1080/02827581.2013.838299
- [20] Григорьев И.В., Куницкая О.А., Рудов С.Е., Давтян А.Б. Технология и система машин для раз рубки трасс линейных объектов // Энергия: экономика, техника, экология, 2019. № 10. С. 62–68.
- [21] Karpachev S.P., Zaprudnov V.I., Bykovskiy M.A., Karpacheva I.P. Simulation studies on line intersect sampling of residues left after cut-to-length logging // *Croatian J. of Forest Engineering*, 2020, vol. 41, no. 1, pp. 95–107. DOI: 10.5552/crojfe.2020.531
- [22] Norris C.E., Hogg K.E., Maynard D.G., Curran M.P. Stumping trials in British Columbia – organic matter removal and compaction effects on tree growth from seedlings to midrotation stands // *Canadian J. of Forest Research*, 2014, vol. 44, no. 11, pp. 1402–1418. DOI: 10.1139/cjfr-2014-0168
- [23] Pergola M.T., Saulino L., Castellana M. Towards sustainable management of forest residues in the southern Apennine Mediterranean mountain forests: a scenario-based approach // *Annals of Forest Science*, 2022, v. 79, p. 14. DOI: 10.1186/s13595-022-01128-w
- [24] Ranius T., Hämäläinen A., Egnell G. The effects of logging residue extraction for energy on ecosystem services and biodiversity: A synthesis // *J. of Environmental Management*, 2018, v. 209, pp. 409–425. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.12.048
- [25] Waters C.M., Gonsalves L., Law B. The effect of thinning on structural attributes of a low rainfall forest in eastern Australia // *Forest Ecology and Management*, 2018, v. 409, pp. 571–583. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.11.054
- [26] Грабли лесные EM 2200. ООО «Завод Евромаш». URL: https://www.evromash.com/catalog/navesnoe_oborudovanie/grabli.html#tabs (дата обращения 15.07.22).
- [27] Fang Rake. Leading Edge Attachments. URL: <https://www.digrock.com/fang-raketm/> (дата обращения 17.07.22).
- [28] Excavator stick rake. Digga Manufacturing. URL: <https://www.digga.com/stick-rake-excavator.html> (дата обращения 17.07.22).
- [29] Kenco Brush & Debris Rake. Kenco Corporation. URL: <https://kenco.com/products/brush-debris-rake/> (дата обращения 17.07.22).
- [30] Der Roderechen Woodcracker G. Westtech Maschinenbau GmbH. URL: <https://www.westtech.at/prod/woodcracker-g/> (дата обращения 17.07.22).
- [31] Alfaia De Reche ga. Fravizel Engineering. URL: <https://www.fravizel.com/pt/produtos/funcao/limpeza-de-terras/alfaia-de-reche ga-131> (дата обращения 17.07.22).

Сведения об авторе

Платонов Алексей Александрович — канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», raa7@rambler.ru

Поступила в редакцию 28.09.2022.

Одобрено после рецензирования 14.04.2023.

Принята к публикации 23.08.2023.

FOREST RAKE: PURPOSE, FIELD OF APPLICATION, CLASSIFICATION

A.A. Platonov

Rostov State Transport University, 2, Rostov Rifle Regiment of the People's Militia, 344038, Rostov-on-Don, Russia

paa7@rambler.ru

The current state of technical means of mechanization to collect and rake groundwood both in Russia and in the world is considered. It is recommended to specify these technical means as «a forest rake», their definition is substantiated and the application area is identified. It is revealed that the qualitative characteristics of a forest rake are the span, as well as the number and width of working elements (teeth). It was revealed that about 50 % of forest rake models produced by domestic and foreign industries have a tooth width in the range of 19...32 mm, and a span of 1000...2000 mm (≈ 51 %), about 25 % of all forest rake models have 6, and more than 58 % with the number of teeth 5...9. The first developed classification of forest rakes provides 3 primary classification features with the highest level of hierarchy of the resulting classification tree, equal to 6. The results of the study can be used by manufacturing enterprises involved in the maintenance and operation of the territories of various objects.

Keywords: unwanted vegetation, removal, mechanization, forest rakes, classification, characteristics

Suggested citation: Platonov A.A. *Grabli lesnye: naznachenie, oblast' primeneniya, klassifikatsiya* [Forest rake: purpose, field of application, classification]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 6, pp. 139–150. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-139-150

References

- [1] Abakumov G.V. *Elementy transportnoy infrastruktury. Avtomobil'nyye dorogi* [Transport infrastructure elements. Highways]. Tyumen: TyumNGU, 2012, 101 p.
- [2] Solodkiy A.I., Gorev A.E., Bondareva E.D. *Transportnaya infrastruktura* [Transport infrastructure]. Moscow: Yurayt, 2020, 290 p.
- [3] Apattsev V., Aksenov V., Zavyalov A. Upgrading technological processes of operating the railway infrastructure facilities. *MATEC Web of Conferences*, 2018, p. 04010. DOI: 10.1051/mateconf/201823904010
- [4] Bartenev I.M., Drapalyuk M.V., Kazakov V.I. *Sovershenstvovaniye tekhnologiy i sredstv mekhanizatsii lesovosstanovleniya* [Improvement of technologies and means of reforestation mechanization]. Moscow: FLINTA-Nauka, 2013, 208 p.
- [5] Mokhiev A.P., Zyryanov M.A., Bezrukikh Yu.A. *Sovremennyye tekhnologii zagotovki i pererabotki drevesnoy biomassy na stadii lesozagotovitel'nogo proizvodstva* [Modern technologies of harvesting and processing of woody biomass at the stage of logging production]. Krasnoyarsk: SibSTU, 2015, 73 p.
- [6] Elkin S.Yu., Safonov V.V., Polupanov I.T. *Osnastka i tekhnologiya vosstanovleniya zub'yev poperechnykh grabel'* [Tooling and technology for restoring the teeth of the transverse rake]. *Nauchnoye obozreniye* [Scientific Review], 2011, no. 6, pp. 32–38.
- [7] Silaev G.V. *Mashiny i mekhanizmy v lesnom i lesoparkovom khozyaystve: v 2 chastyakh. Chast' 2* [Machines and mechanisms in forestry and forestry: in 2 hours. Part 2]. Moscow: Yurayt, 2020, 229 p.
- [8] Patyakin V.I. *Tekhnologiya i mashiny lesosechnykh rabot* [Technology and machines of logging operations]. Saint Petersburg: SPbGLTU, 2012, 362 p.
- [9] Shegelman I.R., Skrypnik V.I., Galaktionov O.N. *Tekhnicheskoye osnashcheniye sovremennykh lesozagotovok* [Technical equipment for modern logging]. Saint Petersburg: Profi-Inform, 2005, 344 p.
- [10] Vinokurov V.N. *Sistema mashin v lesnom khozyaystve* [System of machines in forestry]. Moscow: Academy, 2004, 320 p.
- [11] Kononovich D.A., Mokhov S.P., Simanovich V.A. *Analiz konstruktivnykh osobennostey mashin dlya sbora lesosechnykh otkhodov* [Analysis of the design features of machines for collecting logging waste]. *Trudy BGTU. № 2. Lesnaya i derevobrabatывayushchaya promyshlennost'* [Proceedings of BSTU. Vol. 2. Timber and woodworking industry], 2016, no. 2 (184), pp. 31–35.
- [12] Platonov A.A. *Autsorsing v oblasti bor'by s nezhelatel'noy rastitel'nost'yu na ekspluatatsionnykh ob'yektakh infrastruktury* [Outsourcing in the field of combating unwanted vegetation at operational infrastructure facilities]. *Nauchnoye obozreniye* [Scientific Review], 2017, no. 8, pp. 68–73.
- [13] Order of JSC «Russian Railways» dated February 17, 2010 no. 334r «Transfer to network outsourcing of works (services) in the field of protective afforestation, maintenance of land plots of the right-of-way and protected zones, landscaping and improvement, combating unwanted vegetation at operational infrastructure facilities». Available at: <https://jd-doc.ru/2010/fevral-2010/6902-rasporyazhenie-oao-rzhd-ot-17-02-2010-n-334r> (accessed 15.07.22).
- [14] Ersson B.T., Platonov A., Zimarin S.V. Analysis of the information content of tenders for the removal of unwanted vegetation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Forestry Forum «Forest ecosystems as global resource of the biosphere: calls, threats, solutions»*, 2020, p. 012022. DOI: 10.1088/1755-1315/595/1/012022
- [15] Tikachev V.I. *Mashiny dlya izmel'cheniya drevesiny* [Wood chipping machines]. *LesPromInform*, 2010, no. 2(68), pp. 92–104.
- [16] Tikachev V.I. *Mul'chery i izmel'chiteli pney* [Mulchers and stump grinders]. *LesPromInform*, 2010, no. 4(70), pp. 76–81.
- [17] Ivashnev M.V. *Nauchnyye osnovy sovershenstvovaniya mashin dlya udaleniya drevesno-kustarnikovoy rastitel'nosti pri nepreryvnom dvizhenii bazovogo traktora* [Scientific basis for improving machines for removing trees and shrubs with continuous movement of the base tractor]. *Dis. Dr. Sci. (Tech.) 05.21.01. Petrozavodsk*, 2019, 36 p.
- [18] Shirnin Y.A., Gaisin I.G., Rukomojnikov K.P., Shirnin A.Y. *Obosnovaniye neobходимosti razvitiya strategii tekhnologicheskikh processov lesopol'zovaniya na lesnykh plantatsiyah* [Strategy for technological processes of forest management in forest plantations]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 3, pp. 49–57. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-3-49-57

- [19] Gerasimov Y., Senko S., Karjalainen T. Prospects of Forest Road Infrastructure Development in Northwest Russia with Proven Nordic Solutions. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2013, v. 28, no. 8, pp. 758–774. DOI: 10.1080/02827581.2013.838299
- [20] Grigoriev I.V., Kunitskaya O.A., Rudov S.E. *Tekhnologiya i sistema mashin dlya razrubki trass lineynykh ob'yektov* [Technology and system of machines for cutting lines of linear objects]. *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya* [Energy: economics, technology, ecology], 2019, no. 10, pp. 62–68. DOI: 10.7868/S0233361919100082
- [21] Karpachev S.P., Zaprudnov V.I., Bykovskiy M.A. Simulation studies on line intersect sampling of residues left after cut-to-length logging. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2020, vol. 41, no. 1, pp. 95–107. DOI: 10.5552/crojfe.2020.531
- [22] Norris C.E., Hogg K.E., Maynard D.G. et al. Stumping trials in British Columbia — organic matter removal and compaction effects on tree growth from seedlings to midrotation stands. *Canadian Journal of Forest Research*, 2014, vol. 44, no. 11, pp. 1402–1418. DOI: 10.1139/cjfr-2014-0168
- [23] Pergola M.T., Saulino L., Castellaneta M. et al. Towards sustainable management of forest residues in the southern Apennine Mediterranean mountain forests: a scenario-based approach. *Annals of Forest Science*, 2022, v. 79, p. 14. DOI: 10.1186/s13595-022-01128-w
- [24] Ranius T., Hämäläinen A., Egnell G. The effects of logging residue extraction for energy on ecosystem services and biodiversity: A synthesis. *J. of Environmental Management*, 2018, vol. 209, pp. 409–425. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.12.048
- [25] Waters C.M., Gonsalves L., Law B. The effect of thinning on structural attributes of a low rainfall forest in eastern Australia. *Forest Ecology and Management*, 2018, v. 409, pp. 571–583. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.11.054
- [26] Forest rake EM 2200. Euromash Plant LLC. Available at: https://www.evromash.com/catalog/navesnoe_oborudovanie/grabli.html#tabs (accessed 15.07.22).
- [27] Fang Rake. Leading Edge Attachments. Available at: <https://www.digrock.com/fang-raketm/> (accessed 17.07.22).
- [28] Excavator stick rake. Digga Manufacturing. Available at: <https://www.digga.com/stick-rake-excavator.html> (accessed 17.07.22).
- [29] Kenco Brush & Debris Rake. Kenco Corporation. Available at: <https://kenco.com/products/brush-debris-rake/> (accessed 17.07.22).
- [30] Der Roderechen Woodcracker G. Westtech Maschinenbau GmbH. Available at: <https://www.westtech.at/prod/woodcracker-g/> (accessed 17.07.22).
- [31] Alfaia De Rechega. Fravizel Engineering. Available at: <https://www.fravizel.com/pt/produtos/funcao/limpeza-de-terras/alfaia-de-rechega-131> (accessed 17.07.22).

Author's information

Platonov Aleksey Aleksandrovich — Cand. Sci. (Tech.), Associated Professor of the Rostov State Transport University, paa7@rambler.ru

Received 28.09.2022.

Approved after review 14.04.2023.

Accepted for publication 23.08.2023.

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРА ЛИНЕЙНОЙ КОМБИНАЦИИ ДВУХ ПРОЕКТОРОВ

А.М. Ветошкин^{1✉}, А.А. Шум²

¹ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

²ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Россия, 170026, г. Тверь, ул. Набережная Афанасия Никитина, д. 22

vetkin@mgul.ac.ru

Показано, что в канонической форме Жордана линейной комбинации проекторов $aP + bQ$ при $a^2 - b^2 \neq 0$ наблюдается следующая симметрия относительно значения $\beta = 0,5(a + b)$. Если есть несколько клеток $J_k(\lambda)$, то есть ровно столько же клеток $J_k(2\beta - \lambda)$. Для клеток с $\lambda = a, b, 0, a + b$ симметрия несколько нарушается: если есть клетка $J_k(\lambda)$, то обязательно есть парная клетка $J_l(2\beta - \lambda)$, где $|k - l| \leq 1$, причем или k , или l больше единицы. Определено, что клетки $J_k(\beta)$ должны иметь четный порядок. Для получения этого результата была применена теорема Фландерса, в которой говорится о клетках в канонической форме Жордана матриц AB и BA . Выявлено, что для случая $a = 1$ и $b = -1$, несмотря на то, что $a^2 - b^2 = 0$, результаты, сформулированные выше, частично остаются в силе. Оказалось, что в канонической форме Жордана разности $P - Q$ наблюдается следующая симметрия. Если есть несколько жордановых клеток $J_k(\lambda)$, $\lambda \neq 0, \pm 1$, то есть ровно столько же клеток $J_k(-\lambda)$. Для клеток с $\lambda = 1, -1$ симметрия несколько нарушена: если есть клетка $J_k(\pm 1)$, то обязательно есть парная клетка $J_l(\mp 1)$, где $|k - l| \leq 1$, причем или k , или l больше единицы. Определено, что эти результаты очень напоминают теорему Фландерса. Оказалось, что это не случайно. Теорема Фландерса получена в данной работе, как применение приведенного выше результата о спектре разности проекторов

Ключевые слова: линейная комбинация проекторов, жорданова нормальная форма, жорданова клетка, подбие, теорема Фландерса

Ссылка для цитирования: Ветошкин А.М., Шум А.А. Особенности спектра линейной комбинации двух проекторов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 6. С. 151–159.
DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-151-159

Проекторы являются матрицами с простейшим устройством спектра — всего два различных собственных значения, все жордановы клетки размера 1. Линейная комбинация проекторов $aP + bQ$ может быть гораздо богаче в своем спектральном устройстве.

Цель работы

Цель работы — исследование свойств спектра линейной комбинации проекторов.

Постановка задачи

Квадратная матрица P называется проектором, если $P = P^2$. Нами получены результаты об устройстве спектра линейной комбинации двух проекторов.

Настоящая работа является продолжением работы [1], в которой исследуется жорданова форма разности двух проекторов $Q - P$.

Материалы и методы

Обозначим $M_{m,n}$ — множество прямоугольных матриц размера $m \times n$ с элементами из поля \mathbb{R} или \mathbb{C} . M_n — множество квадратных матриц порядка n ;

$\lambda(A)$ — множество собственных значений квадратной матрицы A ; $\lambda_i(A)$ — i -е собственное значение квадратной матрицы A ; I_n — единичная матрица порядка n (или просто I);

$\text{tr } A = \sum_{i=1}^n a_{i,i}$ — след матрицы, сумма элементов на

главной диагонали; $\det A$ — определитель матрицы A ; $\text{rk}(A)$ — ранг матрицы A .

Определим матрицу T_k как квадратную матрицу порядка k , содержащую единицы в соседней с главной диагональю «наддиагонали» и нули во всех остальных позициях. Таким образом, $T_1 = 0$, $(T_k)^k = 0$. Жорданова клетка $J_k(\lambda)$ порядка k задается как

$$J_k(\lambda) = \lambda I_k + T_k.$$

Определим квадратную матрицу порядка k $S_k = \text{diag} \{+1, -1, +1, -1, \dots\}$, на диагонали которой чередуются 1 и -1 . Выполняются следующие соотношения:

$$S_k^2 = I_k; S_k T_k S_k = -T_k; J_k(-\mu) = -S_k J_k(\mu) S_k.$$

Результаты и обсуждение

Спектр разности проекторов изучался разными авторами: в работе [2] — применительно

к проекторам в конечномерном пространстве, в работе [3] — для ортопроекторов в гильбертовом пространстве; в работе [4] — для произвольных проекторов в банаховой алгебре. В этих работах представлены главным образом материалы изучения связи спектра разности (или суммы) проекторов со спектром произведения рассматриваемых проекторов.

В отличие от работ [2–4], в работе [1] приведены результаты о симметрии в спектре разности проекторов. Основным результатом заключается в следующем:

Теорема 1. Для того чтобы матрица F равнялась разности двух проекторов $F = Q - P$, необходимо и достаточно выполнения следующих условий:

а) жордановы клетки для собственных значений, отличных от 0 и ± 1 входят в жорданову нормальную форму матрицы F строго парами — если есть несколько клеток $J_{g_i}(\lambda)$, то есть ровно столько же клеток $J_{g_i}(-\lambda)$;

б) жордановы клетки, входящие в нормальную форму матрицы F для собственных значений плюс-минус единица, можно разбить на пары $\{J_{g_i}(1), J_{h_j}(-1)\}$ так, что $|g_i - h_j| \leq 1$, при этом в указанные пары должны входить все жордановы клетки порядка > 1 , клетки порядка 1 — $J_1(1)$, $J_1(-1)$ необязательно входят в указанные пары.

Отметим, что в жордановой нормальной форме матрицы F количество клеток $J_1(1)$, $J_1(-1)$ и $J_k(0)$ может быть любым и для любого k .

Исследуем спектр линейной комбинации двух проекторов $P, Q \in M_n$:

$$F = aP + bQ.$$

Случай $a = 0$ или $b = 0$ с точки зрения устройства спектра матрицы F не интересен, поэтому считаем, что $a, b \neq 0$.

Случай, когда $a + b = 0$, исследован в теореме 1.

Сумму двух проекторов можно представить в виде

$$P + Q = [P - (I - Q)] + I.$$

Здесь в квадратных скобках вычисляется разность двух проекторов. Поэтому случай $a = b$ сводится к случаю $a + b = 0$.

Таким образом, в дальнейшем можно считать, что $a^2 - b^2 \neq 0$.

Результаты об устройстве спектра линейной комбинации двух проекторов приведены в работе [5] без доказательств. Кроме того, в отличие от настоящей работы, в работе [5] нет полной формулировки необходимых условий.

Основным результатом проведенных нами исследований является теорема 2.

Теорема 2. Для того чтобы матрица F равнялась линейной комбинации двух проекторов

$F = aP + bQ$; $a, b, a^2 - b^2 \neq 0$, необходимо и достаточно выполнения следующих условий:

а) жордановы клетки для собственных значений $\lambda \notin \{0, 5(a + b), a, b, 0, a + b\}$ входят в жорданову нормальную форму матрицы F строго парами — если есть несколько клеток $J_{g_i}(\lambda)$, то есть ровно столько же клеток $J_{g_i}(a + b - \lambda)$;

б) жордановы клетки, входящие в нормальную форму матрицы F для собственных значений a и b можно разбить на пары клеток $\{J_{g_i}(a), J_{h_j}(b)\}$ так, что $|g_i - h_j| \leq 1$, при этом в указанные пары клеток должны входить все жордановы клетки порядка > 1 , клетки порядка 1 — $J_1(a)$, $J_1(b)$ необязательно входят в указанные пары клеток;

в) жордановы клетки, входящие в нормальную форму матрицы F для собственных значений 0 и $a + b$, можно разбить на пары клеток, $\{J_{g_i}(0), J_{h_j}(a + b)\}$ так, что $|g_i - h_j| \leq 1$, при этом в указанные пары клеток должны входить все жордановы клетки порядка > 1 , клетки порядка 1 — $J_1(0)$, $J_1(a + b)$ необязательно входят в указанные пары клеток;

г) жордановы клетки, входящие в нормальную форму матрицы F для собственного значения $\lambda = 0, 5(a + b)$, должны иметь четный порядок.

Отметим, что теорему 1 можно в некотором смысле считать частным случаем теоремы 2, получаемым при значениях $a = -1$, $b = 1$.

Если $a + b = 0$, утверждения а) теорем 1 и 2 совпадают. Утверждение б) теоремы 2 для пары $\{J_{g_i}(a), J_{h_j}(b)\}$ совпадает с утверждением б) теоремы 1 для пары $\{J_{g_i}(-1), J_{h_j}(1)\}$.

Однако утверждение в) теоремы 2 для пары $\{J_{g_i}(0), J_{h_j}(a + b)\}$ теряет смысл и, так сказать, дезавуирует утверждение г) теоремы 2 для этого случая.

Как оказалось, с теоремами 1 и 2 тесно связана теорема [6–8], которую иногда называют теоремой Фландерса.

В работе [9], а также в работах [10–14], эта теорема применяется как универсальное средство для определения жордановой структуры классов матриц, задаваемых как произведение двух кососимметричных, эрмитовых, инволютивных матриц или как произведение симметричной и кососимметричной матриц.

Теорему Фландерса можно сформулировать следующим образом:

Теорема 3 (теорема Фландерса). Пусть $S \in M_m$, $R \in M_n$. Для того чтобы система уравнений относительно неизвестных матриц A и B

$$\begin{cases} AB = S \\ BA = R \end{cases}, \quad A \in M_{m,n}, \quad B \in M_{n,m},$$

имела решение, необходимо и достаточно выполнения следующих условий:

а) канонические формы Жордана матриц S и R имеют одинаковые наборы жордановых клеток для ненулевых собственных значений;

б) если $g_1 \geq g_2 \geq \dots \geq g_s$ и $h_1 \geq h_2 \geq \dots \geq h_t$ — это размеры вырожденных жордановых клеток в канонических формах Жордана соответственно матриц S и R , то обязательно $|g_i - h_i| \leq 1$, при $i \leq \min(s, t)$; при $i > \min(s, t)$ все числа g_i или h_i , если таковые имеются, равны 1.

При обосновании теоремы 1 в работе [1] самым сложным является доказательство необходимости условия б). Применение теоремы 3 могло бы значительно облегчить это доказательство. (К сожалению, во время написания работы [1] теорема 3 не была известна автору, и эта возможность была упущена). Факт необходимости условия б) в теореме 1 из работы [1] можно применить для обоснования необходимости условия б) теоремы 3 — самой сложной части в доказательстве теоремы Фландерса.

Достаточность в теореме 3 следует из наличия матриц A и B , таких, что AB и BA удовлетворяют условиям а) и б) теоремы 3. Пример таких матриц можно найти в теореме 5 из работы [15]. В последнем разделе данной работы показано, как необходимость в теореме 3 может быть выведена из теоремы 1.

Свойства линейной комбинации двух проекторов

Пусть матрица F является линейной комбинацией двух проекторов Q и P : $F = aP + bQ$, или $F - aP = bQ$. Возведем обе части последнего равенства в квадрат:

$$F^2 - a(FP + PF) + a^2P = b^2Q = b(F - aP).$$

Получаем:

Утверждение 1. Матрица F равняется линейной комбинации проекторов Q и P

$$F = aP + bQ$$

тогда и только тогда, когда

$$(F - \beta I)P + P(F - \beta I) = (F^2 - bF)a^{-1}, \quad (1)$$

$$\beta = 0,5(a + b).$$

Утверждение 1 в обратную сторону получается так. Из уравнения (1) следует, что

$$b(F - aP) = F^2 - a(FP + PF) + a^2P,$$

или

$$b(F - aP) = (F - aP)^2.$$

Утверждение 1 вытекает из того, что выражение $F - aP$ является кратным проектору.

В равенстве (1) сделаем замену

$$S = F - \beta I, \quad (2)$$

тогда

$$SP + PS = S + S^2 a^{-1} + \tau I a^{-1}, \quad (3)$$

где

$$\tau = 0,25(a^2 - b^2).$$

Если λ является собственным значением F , то $\mu = \lambda - \beta$ — собственное значение S .

Необходимо выяснить, какими свойствами должна обладать матрица S , для того чтобы существовало решение-проектор P уравнения (3).

Уравнение (3) для невырожденных матриц S всегда имеет следующее решение, необязательно являющееся проектором

$$P = 0,5(I + Sa^{-1} + \tau a^{-1}S^{-1})/2. \quad (4)$$

Теорема 1 в работе [1] получена как результат исследования уравнения (3) для $\tau = 0$.

Далее обоснуем теорему 2 как результат изучения свойств матрицы S из уравнения (3) при $\tau \neq 0$. Сначала производимые выкладки почти точно повторяют выкладки в работе [1], поэтому излагаются конспективно.

Применим к матрицам S , P , Q подобие, приводящее матрицу S к жордановой нормальной форме. Обозначим полученные подобные матрицы теми же символами. Таким образом, уравнения (3) и (4) не изменят своего вида.

Расположим жордановы клетки матрицы S следующим образом

$$S = \text{diag}\{\dots, J_\mu, \dots\}, \quad (5)$$

$$J_\mu = \text{diag}\{\dots, J_{k_i}(\mu), \dots, J_{l_j}(-\mu), \dots\},$$

где матрица J_μ содержит все жордановы клетки матрицы S с собственными значениями μ и $-\mu$.

Матрицы P , Q , как и в работе [1] имеют блочно-диагональный вид, который определяется размерами блоков J_μ :

$$P = \text{diag}\{\dots, P_\mu, \dots\},$$

$$Q = \text{diag}\{\dots, Q_\mu, \dots\}; \quad (6)$$

$$bQ_\mu = -aP_\mu + J_\mu + \beta I.$$

Для каждого блока P_μ выполняется уравнение (3):

$$J_\mu P_\mu + P_\mu = J_\mu + J_\mu^2 a^{-1} + \tau I a^{-1}. \quad (7)$$

Каждый блок P_μ является проектором.

Случай $\mu = 0$ ($\lambda = 0,5(a + b)$). Рассмотрим случай $\mu = 0$. Матрица $J_{\mu=0}$ имеет вид

$$J_{\mu=0} = \text{diag}\{\dots, T_{k_i}, \dots\}.$$

Размеры блоков T_{k_i} будут определять блочное разбиение матрицы $P_{\mu=0}$. Рассмотрим в полученной блочной матрице $P_{\mu=0}$ любой диагональный блок и обозначим его буквой p . Пусть порядок

этого блока равен k . Из выражения (7) следует, что

$$T_k p + p T_k = T_k + T_k^2 a^{-1} + \tau I_k a^{-1}. \quad (8)$$

Пусть x_1, x_2, \dots, x_{k-1} — это элементы «под-диагонали», соседней с главной диагональю в матрице p . Тогда главная диагональ матрицы $T_k p + p T_k$ принимает вид

$$x_1, x_1 + x_2, x_2 + x_3, \dots, x_{k-2} + x_{k-1}, x_{k-1}.$$

Из уравнения (8) следует, что все элементы последнего вектора должны быть равны τa^{-1} , что возможно только если k четное. Учитывая подстановку (2), $\mu = 0$ у матрицы S , соответствует $\lambda = 0,5(a + b)$ у матрицы F , это обосновывает необходимость пункта в) теоремы 2.

Достаточность в этом пункте следует из наличия следующего решения уравнения (8):

$$p = I_k \otimes \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \tau a^{-1} & 0 \end{pmatrix} + T_k \otimes \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ a^{-1} & 0 \end{pmatrix}; \quad p^2 = p, \quad (9)$$

где \otimes — кронекерово произведение [16, 17].

Матрицу $P_{\mu=0}$ можно взять блочно-диагональной с диагональными блоками вида (9).

Случай $\mu \neq 0$ ($\lambda \neq 0,5(a + b)$). Рассмотрим уравнение (7) для случая $\mu \neq 0$. Проведем следующее блочное разбиение J_μ :

$$J_\mu = \text{diag} \{G, H\}, \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} G &= \text{diag} \{J_{g_1}(\mu), J_{g_2}(\mu), \dots, J_{g_s}(\mu)\}; \\ H &= \text{diag} \{J_{h_1}(-\mu), J_{h_2}(-\mu), \dots, J_{h_t}(-\mu)\}. \end{aligned} \quad (11)$$

Считаем, что порядки диагональных блоков матриц G и H упорядочены таким образом:

$$g_1 \geq g_2 \geq \dots \geq g_s \quad \text{и} \quad h_1 \geq h_2 \geq \dots \geq h_t. \quad (12)$$

Пусть G — квадратная матрица порядка k , H — квадратная матрица порядка l . Соответствующее блочное разбиение проектора P_μ будет иметь вид

$$P_\mu = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}, \quad (13)$$

где $A \in M_k, D \in M_l, B \in M_{k,l}, C \in M_{l,k}$.

Подставив матрицы (10) и (13) в уравнение (7), получаем:

$$GA + AG = G + G^2 a^{-1} + \tau I a^{-1}, \quad (14a)$$

$$HD + DH = H + H^2 a^{-1} + \tau I a^{-1}, \quad (14б)$$

$$GB + BH = 0, \quad (14в)$$

$$HC + CG = 0. \quad (14г)$$

Учитывая, что матрица P_μ — проектор, получаем еще четыре условия:

$$BC = A - A^2, \quad (15a)$$

$$CB = D - D^2, \quad (15б)$$

$$AB + BD = B, \quad (15в)$$

$$CA + DC = C. \quad (15г)$$

Поскольку для матрицы G выполняется условие, гарантирующее единственность решения уравнения (14a) [1, 18, 19]:

$$\forall i, j \quad \lambda_i(G) + \lambda_j(G) \neq 0,$$

то из формулы (4) получаем:

$$A = 0,5(I_k + G a^{-1} + \tau G^{-1} a^{-1}).$$

Аналогично для (14б):

$$D = 0,5(I_l + H a^{-1} + \tau H^{-1} a^{-1}).$$

Подставив матрицы A и D в равенства (15в) и (15г), получаем следствия условий (14в) и (14г).

Подставив A и D в равенства (15a) и (15б), соответственно получаем:

$$BC = (0,5(a^2 + b^2)I - G^2 - \tau^2 G^{-2})(2a)^{-2}, \quad (16)$$

$$CB = (0,5(a^2 + b^2)I - H^2 - \tau^2 H^{-2})(2a)^{-2}. \quad (17)$$

Добавим к последним двум уравнениям уравнения (14в) и (14г), получим систему уравнений (14в), (14г), (16), (17), наличие решения которой будет необходимым и достаточным условием, наличия решения уравнения (7).

Определим функцию:

$$f(x) = (0,5(a^2 + b^2) - x^2 - \tau^2 x^{-2})(2a)^{-2}.$$

Правые части равенств (16) и (17) равны $f(G)$, $f(H)$.

Поскольку G и H — блочно-диагональные матрицы (11), то для того чтобы увидеть, какой вид будут иметь правые части уравнений (16) и (17), достаточно вычислить

$$\begin{aligned} f(J_k(\mu)) &= (0,5(a^2 + b^2)I_k - (\mu I_k + T_k)^2 - \\ &\quad - \tau^2(\mu I_k + T_k)^{-2})(2a)^{-2}. \end{aligned} \quad (18)$$

(В формуле (18) для матрицы H вместо μ нужно подставить $-\mu$).

Для обратной матрицы в формуле (18) выполняется равенство

$$(\mu I + T_k)^{-2} = \mu^{-2} \sum_{i=0}^{k-1} (i+1) \left(-\frac{T_k}{\mu} \right)^i, \quad T^0 = I. \quad (19)$$

Подставим равенство (19) в формулу (18)

$$\begin{aligned} f(J_k(\mu)) &= f(\mu)I_k + [T_k(2\tau^2\mu^{-3} - 2\mu) - \\ &\quad - T_k^2(1 + 3\tau^2\mu^{-4}) - \tau^2\mu^{-2} \sum_{i=3}^{k-1} (i+1) \left(-\frac{T_k}{\mu} \right)^i] (2a)^{-2}. \end{aligned} \quad (20)$$

Матрицы BC и CB в уравнениях (16), (17) будут вырожденными только тогда, когда $f(\mu) = 0$. Уравнение $f(\mu) = 0$ имеет четыре корня:

$$\mu_{1-4} = \frac{a-b}{2}, \frac{b-a}{2}, \frac{-a-b}{2}, \frac{a+b}{2}. \quad (21)$$

Соответствующие собственные значения матрицы F имеют вид

$$\lambda_{1-4} = a, b, 0, a + b.$$

Если $\mu \neq \mu_{1-4} (\lambda_{1-4} \neq a, b, 0, a + b)$, то матрицы BC и CB невырожденные, откуда следует, что матрицы B и C также невырожденные. Тогда из условия (14в) получаем:

$$G = -BHB^{-1}.$$

Матрицы G и $-H$ подобны и поэтому имеют одинаковые жордановы клетки. Отсюда следует, что матрицы G и H имеют жордановы клетки одинаковых размеров. Таким образом обоснована необходимость условия а) в теореме 2.

Пусть теперь μ такое, что $f(\mu) = 0$. Матрица $f(J_k(\mu))$ является треугольно-теплицевой:

$$M = f(J_k(\mu)) = \sum_{i=1}^{k-1} \alpha_i T_k^i, \quad (22)$$

причем при $\mu = \mu_{1-4}$, коэффициент $\alpha_1 = (2\tau^2\mu^{-3} - 2\mu)(2a)^{-2}$ не равен нулю.

Нильпотентная матрица M в выражении (22) подобна T_k . Пусть M подобна $\text{diag}(\dots, T_{k_i}, \dots)$, где $0 < k_i < k$; $\sum k_i = k$. Тогда, $M^{\max k_i} = 0$, это противоречит тому, что $M^{k-1} \neq 0$, поскольку $\max k_i \leq k - 1$,

Таким образом, при μ из перечисления (21):

$$BC \sim \text{diag}\{T_{g_1}, T_{g_2}, \dots, T_{g_s}\},$$

$$CB \sim \text{diag}\{T_{h_1}, T_{h_2}, \dots, T_{h_t}\}.$$

Отсюда по теореме 3 пункту б) получаем, что размеры диагональных блоков в матрицах G и H , перечисленных в выражении (12) удовлетворяют условиям

$$|g_i - h_i| \leq 1, \quad i \leq \min(s, t);$$

$$g_i = 1 \text{ или } h_i = 1, \quad i > \min(s, t).$$

Следовательно, обоснована необходимость условий б) и в) в теореме 2.

Отдельный случай необходимо рассмотреть, когда в матрице (10) J_μ нет одной из матриц — G или H . Пусть, например, отсутствует матрица H . Аналогично решению уравнения (14а) получаем:

$$P_\mu = 0,5(I_k + Ga^{-1} + \tau G^{-1}a^{-1}).$$

Матрица P_μ — проектор, поэтому $P_\mu - P_\mu^2 = 0$. Матрица $P_\mu - P_\mu^2$ уже вычислялась ранее (см. правую часть формулы (16), т. е. в данном случае аналогично выражению (22) получаем:

$$0 = P_\mu - P_\mu^2 = f(G) = \sum_{i=0}^{k-1} \alpha_i T_k^i, \quad \alpha_0 = f(\mu),$$

$$\alpha_1 = (2\tau^2/\mu^3 - 2\mu)/(2a)^2.$$

Отсюда следует, что $f(\mu) = 0$. Таким образом, $\mu = \mu_{1-4} (\lambda_{1-4} = a, b, 0, a + b)$.

Выше установлено, что при таких значениях μ коэффициент α_1 не равен нулю, поэтому на главной диагонали матрицы G могут находиться жордановы блоки только размера 1. Матрица G является скалярной.

Достаточность условий а), б) и в) в теореме 2. Достаточность условия а) теоремы 2 вытекает из следующего примера, приведенного для одной пары клеток $J_k(\mu)$ и $J_k(-\mu)$, (для краткости обозначим $Z = J_k(\mu)$):

$$aP + bQ = \begin{bmatrix} J_k(\mu) & 0 \\ 0 & J_k(-\mu) \end{bmatrix} + \beta I_{2k},$$

где

$$P = \frac{1}{2a} \begin{bmatrix} aI + Z + \tau Z^{-1} & Z^{-1}(Z^2 - \alpha^2 I)S \\ S(\beta^2 I - Z^2)Z^{-1} & S(aI - Z - \tau Z^{-1})S \end{bmatrix} = \quad (23)$$

$$= \frac{1}{2a} \begin{bmatrix} Z + \alpha I \\ S(\beta I - Z) \end{bmatrix} Z^{-1} [\beta I + Z \quad (Z - \alpha I)S], \quad P^2 = P;$$

$$Q = \frac{1}{2b} \begin{bmatrix} bI + Z - \tau Z^{-1} & -Z^{-1}(Z^2 - \alpha^2 I)S \\ -S(\beta^2 I - Z^2)Z^{-1} & S(bI - Z + \tau Z^{-1})S \end{bmatrix} = \quad (24)$$

$$= \frac{1}{2b} \begin{bmatrix} Z - \alpha I \\ -S(\beta I - Z) \end{bmatrix} Z^{-1} [\beta I + Z \quad -(Z + \alpha I)S], \quad Q^2 = Q;$$

$$\alpha = 0,5(a-b); \quad \beta = 0,5(a-b); \quad \alpha\beta = \tau.$$

В этом примере не важно, является ли μ корнем уравнения $f(\mu) = 0$ или нет. Таким образом, данный пример обосновывает достаточность и для пунктов б) и в) теоремы 2 в случае равных размеров клеток $g_i = h_i$.

Рассмотрим случай, когда $g_i = h_i \pm 1$. Выбором одного из двух значений $\pm\mu$ можно обеспечить такое значение μ , что $g_i = h_i - 1$. Обозначим $k = g_i$.

Приведем пример линейной комбинации проекторов для пары клеток $G = J_k(\mu)$ и $H = J_{k+1}(-\mu)$:

$$aP + bQ = \begin{bmatrix} J_k(\mu) & 0 \\ 0 & J_{k+1}(-\mu) \end{bmatrix} + \beta I_{2k+1}. \quad (25)$$

Как отмечено выше, определим матрицу P — решение-проектор уравнения (7) — если найдем матрицы B и C , удовлетворяющие уравнениям (14в), (14г), (16), (17).

В работе [1] приведено общее решение уравнения типа (14в) или (14г) — $GX + XH = 0$, где коэффициенты G, H определяются в выражении (11).

Матрица X является блочной, размеры блоков в ней определяются размерами диагональных блоков матриц G, H . В матрице X каждый квадратный блок x является теплицевой верхнетреугольной матрицей, помноженной слева на матрицу S_k . Каждый прямоугольный блок матрицы X имеет в своем составе такой квадратный блок x :

$$\text{или } [0 \quad x], \text{ или } \begin{bmatrix} x \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Если число строк меньше числа столбцов, то прямоугольный блок имеет вид $[0 \quad x]$; если число строк больше числа столбцов, то $\begin{bmatrix} x \\ 0 \end{bmatrix}$.

Как видно примеры (23) и (24) имеют квадратные матрицы B и C — теплицевы верхнетреугольные с множителем S_k .

Выберем прямоугольные матрицы B и C , для того чтобы выполнялись равенства (16) и (17). Учитывая, что $f(\mu) = 0$ и формулу (20), выпишем равенства (16) и (17) для случая (25):

$$BC = f(J_k(\mu)) = -[2T_k(\mu - \tau^2\mu^{-3}) + T_k^2(1 + 3\tau^2\mu^{-4}) + \tau^2\mu^{-2} \sum_{i=3}^{k-1} (i+1) \left(-\frac{T_k}{\mu}\right)^i](2a)^{-2};$$

$$CB = f(J_{k+1}(-\mu)) = -[-2T_{k+1}(\mu - \tau^2\mu^{-3}) + T_{k+1}^2(1 + 3\tau^2\mu^{-4}) + \tau^2\mu^{-2} \sum_{i=3}^{k-1} (i+1) \left(\frac{T_{k+1}}{\mu}\right)^i](2a)^{-2}.$$

Определим следующую функцию, которая уже встречалась в формуле (22)

$$r(x) = \sum_{i=1}^{\infty} \alpha_i x^i; \quad \alpha_1 = -2(\mu - \tau^2\mu^{-3})(2a)^{-2};$$

$$\alpha_2 = -(1 + 3\tau^2\mu^{-4})(2a)^{-2}; \quad i \geq 3;$$

$$\alpha_i = -\tau^2(i+1)(-\mu)^{-(i+2)}(2a)^{-2}.$$

Отметим, что $\alpha_i = \alpha_i(\mu)$ и $\alpha_i(-\mu) = (-1)^i \alpha_i(\mu)$, тогда

$$BC = r(T_k); \quad CB = r(-T_{k+1}). \quad (26)$$

Определим функцию $q(x)$ так

$$q(x) = \frac{r(x)}{x}. \quad (27)$$

Выберем матрицы $B \in M_{k,k+1}$ и $C \in M_{k+1,k}$:

$$B = [0 \quad B_1]; \quad C = \begin{bmatrix} C_1 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (28)$$

$$B_1 = q(T_k)S_k; \quad C_1 = -S_k.$$

Как видим, матрицы B_1 и C_1 теплицевы верхнетреугольные с множителем S_k , поэтому B и C удовлетворяют уравнениям (14в) и (14г).

Проверим, выполняются ли равенства (26) для матриц (28).

Получаем

$$BC = B_1 T_k C_1; \quad CB = \begin{bmatrix} 0 & C_1 B_1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Учитывая, что $S_k T_k = -T_k S_k$, для первой матрицы в равенстве (26) получаем

$$BC = q(T_k)S_k T_k (-S_k) = q(T_k)T_k = r(T_k).$$

Первое равенство в (26) обоснованно. Для матрицы CB в равенстве (26), учитывая что $S_k T_k^m S_k = (-1)^m T_k^m = (-T_k)^m$, вычислим:

$$C_1 B_1 = (-S_k)q(T_k)S_k = -q(-T_k). \quad (29)$$

Рассмотрим выражение $r(-T_{k+1})$. Из равенства (27) следует, что

$$r(-T_{k+1}) = [-q(-T_{k+1})]T_{k+1}. \quad (30)$$

Умножение теплицевой верхнетреугольной матрицы слева на T_{k+1} приводит к сдвигу элементов этой матрицы на одну позицию вверх и вправо. Таким образом, в правом верхнем углу матрицы (30) находится матрица (29). Это доказывает, что выбор матриц (28) обеспечивает выполнение равенств (26).

Доказательство теоремы 2 завершено.

Доказательство необходимости в теореме 3.

Определим величину $N(A, \lambda, k)$ как число жордановых клеток $J_k(\lambda)$ в канонической жордановой форме матрицы A .

Для любого ненулевого числа α следующие матрицы подобны $\alpha J_k(\lambda) \sim J_k(\alpha\lambda)$, [20, следствие 3.1.13], поэтому выполняются равенства

$$N(I + \alpha AB, 1 + \alpha\lambda, k) = N(AB, \lambda, k); \quad (31)$$

$$N(-I - \alpha BA, -1 - \alpha\lambda, k) = N(BA, \lambda, k).$$

Доказательство необходимости условий а) и б) в теореме 3 получим из теоремы 1.

Построим проекторы P и Q на основе матриц A и B из теоремы 3:

$$P = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -AB & 2A + ABA \\ -B & 2I + BA \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} A \\ I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -B & 2I + BA \end{bmatrix}; \quad (32)$$

$$Q = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2I + AB & 2A + ABA \\ -B & -BA \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2I + AB \\ -B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & A \end{bmatrix}.$$

Тогда

$$F = Q - P = \begin{bmatrix} I + AB & 0 \\ 0 & -I - BA \end{bmatrix}. \quad (33)$$

Пусть канонические формы Жордана матриц AB и BA соответственно имеют следующие размеры вырожденных жордановых блоков

$$g_1 \geq g_2 \geq \dots \geq g_s \quad (34)$$

и

$$h_1 \geq h_2 \geq \dots \geq h_r \quad (35)$$

Тогда перечисления (34) и (35) являются и размерами жордановых блоков с собственными значениями 1 и -1 матриц $I + AB$ и $-I - BA$.

В силу части б) теоремы 1 для матрицы F эти размеры удовлетворяют неравенствам

$$\begin{aligned} |g_i - h_i| &\leq 1; \quad i \leq \min(s, t); \\ g_i = 1 \quad \text{или} \quad h_i = 1, \quad i > \min(s, t). \end{aligned} \quad (36)$$

Следовательно, обоснована необходимость условия б) в теореме 3.

Рассмотрим теперь ненулевые собственные значения матриц AB и BA . Теорему 1 можно применить к матрице F , однако сложности создает возможное совпадение собственных значений матриц $I + AB$ и $-I - BA$. Кроме того, у каждой из этих матриц могут найтись пары противоположных собственных значений (т. е. два ненулевых собственных значения, дающие в сумме 0).

Пусть $\mu \in \lambda(AB) \setminus \{0\}$, $\nu \in \lambda(BA) \setminus \{0\}$, тогда собственные значения матриц $I + AB$ и $-I - BA$ могут быть равны, если

$$1 + \mu = -1 - \nu. \quad (37)$$

У матриц $I + AB$ и $-I - BA$ могут быть пары противоположных собственных значений, если существуют $\mu_1, \mu_2 \in \lambda(AB) \setminus \{0\}$ и $\nu_1, \nu_2 \in \lambda(BA) \setminus \{0\}$ такие, что соответственно

$$(1 + \mu_1) + (1 + \mu_2) = 0; \quad (38)$$

$$(-1 - \nu_1) + (-1 - \nu_2) = 0. \quad (39)$$

Как видно, условия (37)–(39) имеют одинаковый вид, и если выбрать ненулевое число α так, что выполняется

$$\alpha(\mu + \nu) \neq -2, \quad (40)$$

$$\forall \mu, \nu \in (\lambda(AB) \setminus \{0\}) \cup (\lambda(BA) \setminus \{0\}),$$

то собственные значения матриц $I + \alpha AB$ и $-I - \alpha BA$ уже не могут совпадать, и каждая из этих матриц не имеет противоположных собственных значений.

Перейти к этим матрицам можно, например, подставив в формулы (32) и (33) вместо матрицы A матрицу αA :

$$F' = \begin{bmatrix} I + \alpha AB & 0 \\ 0 & -I - \alpha BA \end{bmatrix}. \quad (41)$$

Отметим, что условие (40) при выборе значений $\mu = \nu$ гарантирует невырожденность матрицы F' .

Поскольку у матриц $I + \alpha AB$ и $-I - \alpha BA$ отличные от ± 1 собственные значения не могут совпадать и каждая из этих матриц не имеет противоположных собственных значений, то из части а) теоремы 1, примененной к матрице F' , следует, что для любого $\mu \in \lambda(AB)$, $\mu \neq 0$ найдется $\nu \in \lambda(BA)$, такое, что

$$\begin{aligned} N(I + \alpha AB, 1 + \alpha\mu, k) &= \\ &= N(-I - \alpha BA, -1 - \alpha\nu, k). \end{aligned} \quad (42)$$

Поскольку $1 + \alpha\mu$ и $-1 - \alpha\nu$ противоположные собственные значения матрицы F' , то получаем

$$\mu = \nu.$$

Учитывая уравнение (31), из выражения (42) следует необходимость условия а) в теореме 3:

$$N(AB, \mu, k) = N(BA, \mu, k), \quad \mu \neq 0.$$

Следовательно, необходимость в теореме 3 доказана.

Выводы


Теорема 2, доказанная в настоящей работе, описывает специальные свойства симметрии канонической формы Жордана линейной комбинации проекторов. Эти свойства, связанные с теоремой Фландерса, найдут применение в разных разделах линейной алгебры.

Список литературы

- [1] Ветошкин А.М. Жорданова форма разности проекторов // Журнал вычислительной математики и математической физики, 201. Т. 54. № 3. С. 375–390.
- [2] Anderson W.N., Harner E., Trapp G.E. Eigenvalues of the difference and product of projections // Linear Multilinear Algebra, 1985, v. 17, pp. 295–299.
- [3] Omladic M. Spectra of the difference and product of projections // Proc. Amer. Math. Soc., 1987, v. 99, pp. 317–318.
- [4] Baraa M., Boumazgour M. Spectra of the difference, sum, and product of idempotents // Studia Math., 2001, v. 148, no. 1, pp. 1–3.
- [5] Ветошкин А.М. Жорданова форма линейной комбинации двух проекторов // Обзорение прикладной и промышленной математики, 2022. Т. 29. Вып. 3. С. 284–285.
- [6] Flanders H. Elementary divisors of AB and BA // Proc. Amer. Math. Soc., 1951, no. 2, pp. 871–874.
- [7] Parker W.V., Mitchell B.E. Elementary divisors of certain matrices // Duke Math. J., 1952, v. 19, pp. 483–485.
- [8] Thompson R.C. On the matrices AB and BA // Linear Algebra Appl., 1968, no. 1, pp. 43–58.
- [9] Икрамов Х.Д. О произведениях симметричных, кососимметричных, эрмитовых и инволютивных матриц // Вестник Московского университета. Серия 15, Вычислительная математика и кибернетика, 1998. № 1. С. 8–11.
- [10] Drazin M.P. A note on skew-symmetric matrices // Math. Gazette, 1952, v. 36, pp. 253–255.
- [11] Anderson B.D.O. Orthogonal decompositions defined by a pair of skew-symmetric forms // Linear Algebra Appl., 1974, no. 8, pp. 91–93.

- [12] Gow R., Laffey T.J. Paire of alternating forms and products of two skew-symmetric matrices // *Linear Algebra Appl.*, 1984, v. 63, pp. 119–132.
- [13] Dokovic D.Z. On the product of two alternating matrices // *Amer. Math. Monthly*, 1991, v. 98, no. 10, pp. 935–936.
- [14] Ballantine C.S. Some involutory similarities // *Linear and Multilinear Algebra*, 1975, no. 3, pp. 19–23.
- [15] Horn R.A., Merino D.I. Contragredient equivalence: A canonical form and some applications // *Linear Algebra Appl.*, 1995, v. 214, pp. 43–92.
- [16] Lütkepohl H. *Handbook of matrices*. NY: Wiley, 1996, 304 p.
- [17] Bernstein D.S. *Matrix Mathematics. Theory, Facts, and Formulas*. Princeton University Press, 2009, 1101 p.
- [18] Икрамов Х.Д. Спектральные особенности специальных классов матриц // *Вычислительные процессы и системы*, 1991. Вып. 8. С. 168–203.
- [19] Икрамов Х.Д. Численное решение матричных уравнений. М.: Наука, 1984. 192 с.
- [20] Хорн Р., Джонсон Ч. *Матричный анализ*. М.: Мир, 1989. 655 с.

Сведения об авторах

Ветошкин Александр Михайлович  — канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), vetkin@mgul.ac.ru

Шум Александр Анатольевич — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры высшей математики, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», shum@tstu.tver.ru

Поступила в редакцию 21.08.2023.

Одобрено после рецензирования 04.09.2023.

Принята к публикации 11.10.2023.

LINEAR COMBINATION OF TWO PROJECTORS SPECTRUM FEATURES

A.M. Vetoshkin¹ , A.A. Shum²

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

²Tver' State Technical University, 22, Afanasy Nikitin embankment st., Tver, 170026, Russia

vetkin@mgul.ac.ru

It is shown that in the canonical Jordan form of the linear combination of projectors $aP + bQ$ for $a^2 - b^2 \neq 0$ the following symmetry is observed with respect to the value $\beta = 0,5(a + b)$. If there are several cells $J_k(\lambda)$, then there are exactly the same number of cells $J_k(2\beta - \lambda)$. For cells with $\lambda = a, b, 0, a + b$, the symmetry is somewhat broken: if there is a cell $J_k(\lambda)$, then there is necessarily a paired cell $J_l(2\beta - \lambda)$, where $|k - l| \leq 1$, and either k or l is greater than one. It is determined that the cells $J_k(\beta)$ must have an even order. To obtain this result, Flanders' theorem was applied, which talks about cells in the canonical Jordan form of the matrices AB and BA . It is revealed that for the case of $a = 1$ and $b = -1$, despite the fact that $a^2 - b^2 = 0$, the results formulated above partially remain in force. It turned out that the following symmetry is observed in the canonical Jordan form of the difference $P - Q$. If there are several Jordan cells $J_k(\lambda)$, $\lambda \neq 0, \pm 1$, then there are exactly the same number of cells $J_k(-\lambda)$. For cells with $\lambda = 1, -1$, the symmetry is somewhat broken: if there is a cell $J_k(\pm 1)$, then there is necessarily a pair cell $J_l(\mp 1)$, where $|k - l| \leq 1$, and either k or l is greater than one. It is determined that these results are very similar to Flanders' theorem. It turned out that this was no coincidence. Flanders' theorem is obtained in this work as an application of the above result on the spectrum difference of projectors.

Keywords: linear combination of projectors, Jordan normal form, Jordan cell, similarity, Flanders' theorem

Suggested citation: Vetoshkin A.M., Shum A.A. *Osobennosti spektra lineynoy kombinatsii dvukh proektorov* [Linear combination of two projectors spectrum features]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 6, pp. 151–159. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-151-159

References

- [1] Vetoshkin A.M. *Zhordanova forma raznosti proektorov* [Zhordanov form of difference of projectors]. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2014, v. 54, no. 3, pp. 375–390.
- [2] Anderson W.N., Harner E., Trapp G.E. Eigenvalues of the difference and product of projections. *Linear Multilinear Algebra*, 1985, v. 17, pp. 295–299.
- [3] Omladic M. Spectra of the difference and product of projections. *Proc. Amer. Math. Soc.*, 1987, v. 99, pp. 317–318.
- [4] Baraa M., Boumazgour M. Spectra of the difference, sum, and product of idempotents // *Studia Math.*, 2001, v. 148, no. 1, pp. 1–3.
- [5] Vetoshkin A.M. *Zhordanova forma lineynoy kombinatsii dvukh proektorov* [Jordan form of a linear combination of two projectors]. *Obozrenie prikladnoy i promyshlennoy matematiki* [Survey of applied and industrial mathematics], 2022, v. 29, no. 3, pp. 284–285.

- [6] Flanders H. Elementary divisors of AB and BA . Proc. Amer. Math. Soc., 1951, no. 2, pp. 871–874.
- [7] Parker W.V., Mitchell B.E. Elementary divisors of certain matrices. Duke Math. J., 1952, v. 19, pp. 483–485.
- [8] Thompson R.C. On the matrices AB and BA . Linear Algebra Appl., 1968, no. 1, pp. 43–58.
- [9] Ikramov Kh.D. *O proizvedeniyakh simmetrichnykh, kososimmetrichnykh, ermitovykh i involyutivnykh matrits* [On products of symmetric, skew-symmetric, Hermitian and involutive matrices]. Vestn. Mosk. Un-ta. Ser. 15, Vychis. Matem. i Kibern. [Vestn. Moscow University. Ser. 15, Comput. Mat. and Cybern.], 1998, no. 1, pp. 8–11.
- [10] Drazin M.P. A note on skew-symmetric matrices. Math. Gazette, 1952, v. 36, pp. 253–255.
- [11] Anderson B.D.O. Orthogonal decompositions defined by a pair of skew-symmetric forms. Linear Algebra Appl., 1974, no. 8, pp. 91–93.
- [12] Gow R., Laffey T.J. Paire of alternating forms and products of two skew-symmetric matrices. Linear Algebra Appl., 1984, v. 63, pp. 119–132.
- [13] Dokovic D.Z. On the product of two alternating matrices. Amer. Math. Monthly, 1991, v. 98, no. 10, pp. 935–936.
- [14] Ballantine C.S. Some involutory similarities. Linear and Multilinear Algebra, 1975, no. 3, pp. 19–23.
- [15] Horn R.A., Merino D.I. Contragredient equivalence: A canonical form and some applications. Linear Algebra Appl., 1995, v. 214, pp. 43–92.
- [16] Lütkepohl H. Handbook of matrices. NY: Wiley, 1996, 304 p.
- [17] Bernstein D.S. Matrix Mathematics. Theory, Facts, and Formulas. Princeton University Press, 2009, 1101 p.
- [18] Ikramov Kh.D. *Spektral'nyye osobennosti spetsial'nykh klassov matrits* / [Spectral singularities of special classes of matrices]. Vychislitel'nyye protsessy i sistemy [Computing processes and systems]. Iss. 8. [Science. Ch. ed. Phys.-Math. lit.], 1991, pp. 168–203.
- [19] Ikramov Kh.D. *Chislennoe reshenie matrichnykh uravneniy* [Numerical solution of matrix equations]. Moscow: Nauka, 1984, 192 p.
- [20] Horn R., Johnson C. *Matrichnyy analiz* [Matrix analysis]. Moscow: Mir, 1989, 655 c.

Authors' information

Vetoshkin Aleksandr Mikhaylovich✉ — Cand. Sci. (Tech), Associate Professor of BMSTU (Mytishchi branch), vetkin@mgul.ac.ru

Shum Aleksandr Anatol'evich — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor of TvSTU, shum@tstu.tver.ru

Received 21.08.2023.

Approved after review 04.09.2023.

Accepted for publication 11.10.2023.

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

УПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЕМ СИСТЕМ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОТРАБОТКИ СРЕДСТВ ВЫВЕДЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ВЛИЯНИЯ ПОДРЫВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В.Л. Воронцов

АО «Российские космические системы», Россия, 111250, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 53

a762642@yandex.ru

Представлены результаты исследований, касающихся развития систем информационно-телеметрического обеспечения отработки средств выведения. Рассмотрено развитие отечественных систем информационно-телеметрического обеспечения отработки средств выведения в условиях влияния подрывных технологий. Показано, что необходимы организационно-технические меры по существенному улучшению управления развитием отечественных систем информационно-телеметрического обеспечения отработки средств выведения, связанные с созданием, поддержкой и развитием инструментов регламентирования (прежде всего официальной концепции развития систем информационно-телеметрического обеспечения отработки средств выведения и соответствующей ей системы стандартов телеметрии) и условий для их результативного применения.

Ключевые слова: общие (обобщенные) показатели, подрывные технологии, программно-технические средства, система информационно-телеметрического обеспечения отработки средств выведения, телеметрируемый объект, телеметрическая информация

Ссылка для цитирования: Воронцов В.Л. Управление развитием систем информационно-телеметрического обеспечения отработки средств выведения в условиях влияния подрывных технологий // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 6. С. 160–177. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-160-177

Сущности систем информационно-телеметрического обеспечения (далее — ИТМ-обеспечение) отработки средств выведения, искомый результат их развития, инструменты регламентирования, необходимые для полноценного управления развитием систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения определены в работах [1–6]. Представлен [6], по сути, Проект официальной концепции развития отечественных систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения

Актуальность разработки упреждающих (профилактических) мер по развитию систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения в условиях влияния подрывных технологий связана со значительными издержками вследствие вынужденного перехода на интенсивный путь развития, обычно усугубляемого жесткими ограничениями материальных ресурсов и времени, а также необходимостью значительных изменений производственных отношений предприятий/организаций ракетно-космической отрасли (РКО), проявляющихся в соответствующих изменениях их организационно-штатной структуры. Сущности этих мер неочевидны.

Цель работы

Цель работы — рекомендации по предотвращению значительных издержек при решении задач

развития систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения вследствие неготовности к проявлению подрывных технологий.

Общие сведения о системе ИТМ-обеспечения отработки средств выведения. Под этими системами понимают [1] располагаемые материально-технические, стоимостные, временные, людские и другие ресурсы, которыми может воспользоваться оперирующая сторона (в том числе исследователь операции) для достижения цели операции, относящейся к решению задач ИТМ-обеспечения отработки средств выведения [7].

Средствами выведения являются прежде всего ракеты-носители и разгонные блоки ракет космического назначения (РКН), являющиеся также *телеметрируемыми объектами* [8].

На рисунке из работы [1] показаны задачи информационно-телеметрического обеспечения отработки средств выведения и последовательность их выполнения.

Выделены (см. рисунок) наиболее актуальные задачи информационно-телеметрического обеспечения отработки средств выведения, а именно:

- формирование телеметрической информации (ТМ-информации) [8] в бортовой радиотелеметрической системе [8];
- приеморегистрация ТМ-информации;
- сбор ТМ-информации в интересах формирования обобщенного массива данных телеметрических измерений;



Задачи информационно-телеметрического обеспечения [1]
Tasks of information and telemetry support [1]

– формирование обобщенного массива данных телеметрических измерений.

Актуальность решения этих задач обусловлена тем, что с ними связаны значительные потери ТМ-информации вследствие действия неопределенных факторов различной природы.

Если перечисленные задачи ИТМ-обеспечения отнести к системе, то входом этой системы являются *первичные сигналы* (т. е. выходные сигналы датчиков) [8], а ее выходом — обобщенные данные телеизмерений [1].

Атрибутами системы ИТМ-обеспечения обработки средств выведения являются [1] сигналы/данные заданной структуры, содержащие ТМ-информацию; методы и алгоритмы действий над этими сигналами/данными, программно-технические средства (ПТС) и т. д.

Сущности подрывных технологий. Одним из первых понятие «подрывные технологии» («disruptive technologies») ввел и пояснил в середине 1990-х годов Клейтон Кристенсен [9]. По его мнению, существуют технологии *поддерживающие* и *подрывные* [9], в них важно выделить следующее:

– подрывные технологии создают новый рынок, разрушая существующий и вытесняя его признанных лидеров;

– развитие подрывных технологий происходит не скачкообразно: обычно от производства «сырых» образцов до появления на рынке полноценных конкурентноспособных продуктов про-

ходит период времени, которое целесообразно использовать заинтересованным предприятиям для принятия мер по перестройке своей работы под новые условия;

– для мониторинга развития подрывной технологии от момента ее зарождения до полноценной практической реализации и разработки эффективных упреждающих мер по купированию связанных с ней угроз нужны специалисты, подразделения в составе заинтересованных предприятий.

Чтобы проиллюстрировать существенное влияние подрывных технологий на производственные отношения, на социальные процессы, приведены следующие хрестоматийные примеры:

– внедрение ткацкого станка в Индии, повлекшее обнищание и гибель от голода индийских ткачей;

– создание Фордом автомобиля для массового применения, заменившего в городах конный транспорт;

– изобретение цифровой камеры и отказ от фотопленки, ставшие причиной банкротства фирмы Kodak и других (важно обратить внимание на тот факт, что именно специалисты фирмы Kodak изобрели цифровую камеру, но их изобретение не было использовано в интересах фирмы должным образом).

Как показывает практика, подрывную технологию весьма проблематично распознать на этапе ее зарождения, на ранних этапах ее развития, чтобы иметь достаточное время на адаптацию

к связанным с ней изменениям условий, отрабатывать на упреждение.

История знает многочисленные примеры ошибочных прогнозов перспектив развития подрывных технологий. Замечено [10, с. 102, 103], что «когда речь идет о прогнозировании событий с большим числом весьма изменчивых переменных величин, каждая из которых может определить результат, эксперты становятся беспомощными».

Так, президент киностудии «Warner Bros. Pictures» Гарри Уорнер в 1927 г. прокомментировал появление первых звуковых фильмов на экранах таким образом: «Зачем зрителю слышать, как артисты говорят?» [10]. Роберт Милликен, получивший Нобелевскую премию по физике в 1923 г., заявил: «Нет никакой вероятности, что человек когда-либо сумеет использовать энергию атома». Глава патентного бюро США Чарлз Дьюэлл в 1899 г. сказал: «Все, что можно изобрести, уже изобретено».

Из приведенных примеров [10] следует, что названные люди не могут быть отнесены к категории дилетантов и что по прошествии относительно короткого времени проявилась ошибочность видения ими перспектив.

Более современные примеры также не отличаются высокой точностью прогнозов.

В конце 2003 г. в России насчитывалось свыше 36 млн абонентов сотовой связи, при том, что несколько лет тому назад крупнейшие производители сотовых телефонов (Nokia, Motorola, Ericsson) не сомневались в бесперспективности российского рынка [11].

Примеры, аналогичные указанным выше, можно было бы продолжить. То есть как следует из этих примеров, современные эксперты не прозорливее своих предшественников.

Показано [1], что развитие ПТС и информационных технологий осуществляется в условиях влияния неопределенных факторов различной природы, которое соответствующим образом отражается на результатах развития систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения, причем имеют место тенденции роста неопределенности. В этих условиях, особенно при целевой и поведенческой неопределенности [12], соответственно, снижаются возможности построения полноценных инструментов регламентирования процесса развития систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения и их использования при решении практических задач. Ситуация усугубляется влиянием подрывных технологий.

В этой связи уместно и наглядно следующее гротескное разъяснение [13], иллюстрирующее влияние подрывных технологий на социальные, на производственные отношения, касающееся поведенческой неопределенности.

Древнее племя. Люди не могут добывать огонь, но могут пользоваться им. Существует штат по поддержанию огня (жрецы, чиновники, иерархия). Появляется изобретатель простого устройства добычи огня (появляется подрывная технология). Необходимость в жрецах и т. д. отпадает, но вряд ли они так просто отдадут свои привилегии, свою власть. Отсюда риторические вопросы: какова перспектива внедрения технологии добычи огня в жизнь племени? Какова судьба изобретателя огня?

Для исторического пути развития отечественной телеметрии характерны перманентные организационно-штатные преобразования [14–16]. С одной стороны, такое состояние обычно (традиционно) для отечественной ракетно-космической отрасли, с другой — полученный опыт свидетельствует об актуальности улучшения управления развитием отечественных систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения, принятия своевременных и действенных организационно-технических мер, обеспечивающих, в частности, результативное купирование влияния подрывных технологий, касающихся этих систем.

Инструменты регламентирования. Идеи улучшения и поиск путей совершенствования управления развитием отечественной телеметрии не новы [14–16], однако требуемый комплекс организационно-технических мер по управлению развитием систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения пока не построен. Прежде всего необходим результативный механизм его регламентирования.

На основе анализа опыта отечественных предприятий/организаций ракетно-космической отрасли [14–16], зарубежных организаций (в частности, опыта CCSDS [1]) обосновано и предложено [1–6 и др.] регламентирование развития систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения осуществлять, используя следующие инструменты:

- официальную концепцию развития систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения (с указанием направлений развития);

- *систему* стандартов телеметрии, соответствующую указанной выше концепции, обеспечивающую осуществление рациональных стратегий усовершенствования и применения по назначению систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения (далее — стратегии применения);

- административные положения по поддержанию и развитию концепции и стандартов телеметрии (Устав рабочей группы).

Как показала практика, для результативного управления развитием систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения требуются высококвалифицированные, обладающие специфическими знаниями и большим опытом специалисты.

В этой связи интересен и полезен опыт решения таких задач силами научно-методического отдела предприятия. Возможностей одного предприятия оказалось недостаточно. «Полувекковая история показала, что телеметрия — понятие шире мнения одного предприятия. Телеметрия при той организации, которая сложилась в нашей стране, охватывает далеко не одну отрасль» [15].

Регламентирование необходимо для обеспечения согласованных перманентных действий предприятий/организаций ракетно-космической отрасли, а также заинтересованных предприятий/организаций вне этой отрасли при выполнении операций (стратегий) по усовершенствованию и применению по целевому назначению систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения. Регламентирование требуется для осуществления единой научно-технической политики развития систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения и реализации с помощью этой политики практического системного подхода к их развитию, а также полноценной реализации принципа «наука — практике», с которым связана возможность отбора полезных предложений, поступающих от предприятий/организаций (из состава ракетно-космической отрасли и вне ее), для их последующего практического использования.

Управление развитием отечественных систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения (регламентирование) предлагается [2, 4] осуществлять рабочей группе, состоящей из разносторонних специалистов. При таком подходе не потребуются предварительные изменения производственных отношений предприятий/организаций из состава ракетно-космической отрасли и вне ее, а при необходимости их интересы могут быть удовлетворены через эту рабочую группу.

Факторы, стимулирующие развитие систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения. Развитие этих систем стимулируют следующие факторы [1]:

- 1) новые задачи ИТМ-обеспечения;
- 2) физическое старение ПТС;
- 3) естественный ход развития современных ПТС и информационных технологий, их очевидные достоинства, проявляющиеся при успешном решении аналогичных задач в смежных областях;
- 4) производственные отношения, требующие постоянного повышения технического и технологического уровней предприятий/организаций ракетно-космической отрасли в целях сохранения конкурентоспособности.

Замечено [1], что в настоящее время развитие отечественных систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения осуществляется в условиях доминирования факторов 1–3, что обрекает отечественные предприятия/организации на действия

по устранению последствий проявления подрывных технологий, притом, что усиление влияния фактора 4 позволило бы работать на упреждение.

Методологические основы оценивания развития систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения. Методологические основы оценивания развития этих систем [1–6 и др.] базируются на теории исследования операций с использованием технических систем [7, 12].

Для оценивания результата операции Y , выполненной в соответствии со стратегией u , используют [12] три группы параметров, характеризующих полезный эффект q , материальные затраты C и оперативность T :

$$Y(u) = Y(q(u), C(u), T(u)). \quad (1)$$

При выполнении операции усовершенствования систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения ее результат зависит от выбранной стратегии усовершенствования u_{yc} и заключается в получении полезного эффекта (им служит улучшение $\Delta Y_{\text{прим}}$ результата от применения усовершенствованной системы ИТМ-обеспечения отработки средств выведения), в материальных затратах C_{yc} на усовершенствование и в оперативности T_{yc} процесса усовершенствования (при решении практических задач C_{yc} и T_{yc} могут являться затратами на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы и сроками их выполнения в соответствии с техническим заданием или стратегией u_{yc}) [1, 3]. Конкретизированное под рассматриваемые системы ИТМ-обеспечения отработки средств выведения формульное выражение (1) принимает вид

$$Y_{yc}(u_{yc}) = \langle \Delta Y_{\text{прим}}(u_{yc}), C_{yc}(u_{yc}), T_{yc}(u_{yc}) \rangle, \quad (2)$$

$$u_{yc} \in U_{yc}.$$

В итоге [1] получаем

$$W_{\text{эф}_Y_{yc}} = \langle \Delta W_{\text{эф}_W_{\text{ан}_\Sigma}, \Delta W_{\text{эф}_C_{\text{прим}}}, \Delta W_{\text{эф}_T_{\text{прим}}}, W_{\text{эф}_C_{yc}}, W_{\text{эф}_T_{yc}} \rangle, \quad (3)$$

где $W_{\text{эф}_Y_{yc}}$ — общий показатель эффективности операции усовершенствования системы ИТМ-обеспечения отработки средств выведения;

$W_{\text{эф}_C_{yc}}, W_{\text{эф}_T_{yc}}$ — частные показатели, соответствующие C_{yc} и T_{yc} из выражения (2);

$\Delta W_{\text{эф}_W_{\text{ан}_\Sigma}}$ — показатель улучшения качества данных для решения задач анализа;

$\Delta W_{\text{эф}_C_{\text{прим}}}, \Delta W_{\text{эф}_T_{\text{прим}}}$ — показатели сокращения материальных затрат при решении задач ИТМ-обеспечения и повышения оперативности их решения (при осуществлении стратегий $U_{\text{прим}}$ применения усовершенствованной системы ИТМ-обеспечения отработки средств выведения), соответственно.

Показатели $W_{эф}^*$ (3) зависят от исхода сопоставления [1, 2], оцениваемых (2) показателей результата усовершенствования с их требуемыми значениями, обозначенными дополнением «тр» к индексам: $\Delta Y_{прим}(u_{yc})$ и $\Delta Y_{прим_тр}$, $C_{yc}(u_{yc})$ и $C_{yc_тр}$, $T_{yc}(u_{yc})$ и $T_{yc_тр}$. Причем исходы сопоставления [1], касающиеся $\Delta Y_{прим}$ (2), связаны с применением установленных мер $\Delta I_{ан_сум_сущ}$, $\Delta C_{прим_сущ}$ и $\Delta T_{прим_сущ}$ *существенного* изменения, соответствующих показателям $\Delta W_{эф_W_ан_сум}$, $\Delta W_{эф_C_прим}$ и $\Delta W_{эф_T_прим}$ (3), и получением этих показателей.

Наиболее важным компонентом при вычислении показателя $\Delta W_{эф_W_ан_сум}$ (3) являются характеристики потерь информации или получения дополнительной информации в результате осуществления стратегий усовершенствования U_{yc} и применения $U_{прим}$ систем ИТМ-обеспечения обработки средств выведения.

В частности, вычисление показателей $\Delta W_{эф_W_ан_сум}$ (3) для рассматриваемых систем ИТМ-обеспечения обработки средств выведения осуществляют [1], используя последовательно следующие характеристики:

– $N_i(s)$, $N_j(s)$ — количество ошибок в типовом обобщенном блоке данных, получаемых с применением испытуемого алгоритма A_i и базового алгоритма A_j (A_j заменяют алгоритмом A_i при усовершенствовании систем ИТМ-обеспечения обработки средств выведения); s — состояние помеховой обстановки;

– $\gamma(s)$ — сравнительная характеристика количества ошибок в обобщенном блоке данных;

– $E(s)$ — балльные оценки.

Смысл балльных оценок E ($E = \{-1, 0, 1\}$) состоит в следующем: «достоверность, обеспечиваемая испытуемым алгоритмом, *существенно* лучше обеспечиваемой базовыми алгоритмами» ($E = 1$), «*существенно* хуже» ($E = -1$), «примерно такая же» ($E = 0$). Связь балльных оценок E и показателей $\Delta W_{эф_W_ан_сум}$ для рассматриваемых систем ИТМ-обеспечения обработки средств выведения показана с помощью соответствующих критериев, моделей и методик [1]. Необходимым условием $\Delta W_{эф_W_ан_сум} = 1$ является $E = 1$ (в этом случае стратегия u_{yc} усовершенствования имеет признаки рациональной стратегии $U_{yc_рац}$); $\Delta W_{эф_W_ан_сум} = -1$ при $E = -1$ (в этом случае стратегия u_{yc} исключается из дальнейшего рассмотрения, отбраковывается).

Такой методологический прием позволяет получать сравнительные оценки принципиально разных стратегий усовершенствования систем ИТМ-обеспечения обработки средств выведения [1] по общим (обобщенным) показателям.

Особенности методологии оценивания в условиях влияния подрывных технологий. Необходимым признаком влияния подрывных

технологий, касающихся развития систем ИТМ-обеспечения обработки средств выведения, является *радикальное* изменение показателей (2). Это означает, что «пороговые» значения величин $C_{yc_тр}$, $T_{yc_тр}$, $\Delta I_{ан_сум_сущ}$, $\Delta C_{прим_сущ}$ и $\Delta T_{прим_сущ}$ оказываются замененными на значения величин $C_{yc_рад}$, $T_{yc_рад}$, $\Delta I_{ан_сум_рад}$, $\Delta C_{прим_рад}$ и $\Delta T_{прим_рад}$, соответственно, характеризующих *радикальные* изменения (обозначение «рад» дополнительно к индексам здесь и далее обозначает радикальные изменения). Причем научно-методическое обоснование выбора значений $C_{yc_рад}$, $T_{yc_рад}$, $\Delta I_{ан_сум_рад}$, $\Delta C_{прим_рад}$ и $\Delta T_{прим_рад}$ аналогично [1] выбору значений $C_{yc_тр}$, $T_{yc_тр}$, $\Delta I_{ан_сум_сущ}$, $\Delta C_{прим_сущ}$ и $\Delta T_{прим_сущ}$. Такие замены позволяют относительно просто адаптировать разработанный [1] научно-методический аппарат в части оценивания эффективности операций (стратегий) усовершенствования и применения систем ИТМ-обеспечения обработки средств выведения к условиям влияния подрывных технологий, полноправно применять формульные выражения типа (3).

Следует заметить, что *радикальное* изменение показателей (2) может быть связано не только с влиянием подрывных технологий, но и с другими факторами, следствием влияния которых является выполнение масштабных работ по изменению сущностей систем ИТМ-обеспечения обработки средств выведения. В частности, при подготовке к ИТМ-обеспечению летных испытаний комплекса «Энергия — Буран» на космодроме Байконур общее количество дополнительной разнотипной аппаратуры составило 1110 комплектов, а стоимость дооснащаемых средств телеметрического комплекса космодрома превысила 500 млн руб. (в ценах 1970-х гг.) [14]. Только для приеморегистрации ТМ-информации понадобилось более 100, причем разнотипных, приемно-регистрирующих станций (ПРС), при пуске РКН с ракеты-носителя «Союз» обычно задействуют 12...15 ПРС [1].

Дооснащение телеметрического комплекса космодрома обусловлено характерным для отечественной практики увеличением объема телеизмерений при росте количества телеметрируемых параметров. При этом пропорционально увеличивается количество комплектов *бортовой радиотелеметрической системы* и лавинообразно (вследствие необходимости разнесенного приема *ТМ-информации*) — количество ПТС телеметрического комплекса космодрома (прежде всего, ПРС). Обычно на один комплект *бортовой радиотелеметрической системы* приходится 4...6 наземных ПРС [1]. Отсюда большой разброс количества задействуемых ПТС телеметрического комплекса космодрома в зависимости от *телеметрируемого объекта* и (соответственно)

проблематичность построения компактного телеметрического комплекса космодрома, инвариантного к изменяющимся задачам ИТМ-обеспечения. Также велики потери ТМ-информации.

В связи с этим разработаны [1] стратегии усовершенствования и применения систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения, в соответствии с которыми осуществляется управление избыточностью данных телеметрических измерений, обеспечивающее *существенное* улучшение общих (обобщенных) показателей в выражениях (2) и (3).

Следует отметить, что в случае дооснащения телеметрического комплекса космодрома для решения новых задач ИТМ-обеспечения (типа ИТМ-обеспечения летных испытаний комплекса «Энергия — Буран») применен экстенсивный подход (было значительно увеличено количество ПТС телеметрического комплекса космодрома за счет наращивания в основном известных и применяемых в практике ПТС), а с подрывными технологиями связан вынужденный интенсивный подход (внедрение в состав телеметрического комплекса космодрома качественно, принципиально новых ПТС). То есть *радикальные* изменения показателей выражения (2), обусловленные проявлением подрывных технологий, обеспечиваются реализацией интенсивного подхода к развитию элементов системы ИТМ-обеспечения отработки средств выведения и (соответственно) системы ИТМ-обеспечения отработки средств выведения в целом.

В случае оценивания предстоящих запоздалых операций по купированию последствий проявления подрывных технологий при обосновании выбора значений $C_{ус_рад}$ и $T_{ус_рад}$ приходится учитывать экстремальность условий, в которых приоритет отдается не размеру допустимых материальных трат и экономически выгодным срокам модернизации [1], а возможности дальнейшего существования (выживания) предприятий/организаций, связанных с соответствующей системой ИТМ-обеспечения отработки средств выведения. Материальные затраты $C_{ус}$ и оперативность $T_{ус}$ в выражении (2) могут быть вынужденными — как реакция на сложившуюся ситуацию проявления подрывной технологии, касающейся систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения.

Краткий ретроспективный анализ развития отечественной телеметрии с проявлением влияния подрывных технологий. Проведем краткий ретроспективный анализ развития отечественной телеметрии в части влияния появляющихся технологий, рассмотрим основные тенденции развития, связанные с системами ИТМ-обеспечения отработки средств выведения.

Информативность *радиотелеметрических систем* (РТС) увеличивалась от модификации к модификации [8]: от использования трофейной немецкой РТС «Messina» в начале летных испытаний ракетной техники в Советском Союзе в 1947 г. до современных [15]. При этом информативность РТС увеличивалась следующим образом [15]: «Messina» — четыре телеметрических канала и четыре телеметрируемых параметра; «Бразилионит» [15] (1948 г.) — восемь телеметрируемых параметров; «Дон» (1949 г.) — 16 телеметрических каналов, 30 телеметрируемых параметров; «Трал» (1954 г.) — 48 телеметрических каналов. В начале 1960-х годов были созданы модификации РТС:

– РТС-9 (информативность — 25 600, 12 800 и 3200 измерений/с, количество телеметрических каналов — 512, 256 и 64 соответственно (РТС-9 по информативности более чем в 4 раза превосходила РТС «Трал»);

– БРС-1 и БРС-4 (в отличие от БРС-1 новая БРС-4 имела информативность 320 000 измерений вместо 160 000 измерений/с и 40 каналов *основного коммутатора* [8] вместо 20);

Появление модифицированной бортовой РТС «Орбита» в 2000 г. со скоростью передачи данных до 3,14 Мбит/с отмечено [16] как начало перехода к передаче ТМ-информации быстроизменяющихся параметров по цифровым радиолиниям. В 1977 г. на смену приемно-регистрирующим станциям радиотелеметрической системы РТС-9 МА-9МК, МА-9МСТ начали поступать ПРС нового поколения — МА-9МКТМ-1, а с 1980 г. — более совершенные МА-9МКТМ-4. Примерно в это же время приемно-регистрирующие станции БРС-4 были заменены на более современные БРС-4М, БРС-4МК.

Совершенствовалась технология обработки ТМ-информации (от ручной дешифровки до автоматизированной обработки с применением современных ПТС). К концу 1959 г. прошла государственные испытания первая отечественная система автоматизированной обработки ТМ-информации «Старт» [15]. Разработанная в начале 1960-х годов как спецвычислительная аппаратура МО-9 обеспечивала дешифровку с выдачей результатов обработки ТМ-информации в виде графиков на термочувствительной бумаге [15]. Первый магнитный регистратор был применен в составе ПРС «Трал-К» и в составе системы «Старт» [15] (до этого регистрация ТМ-информации осуществлялась на фотопленку, а позднее — на термочувствительную бумагу).

С появлением магнитного регистратора появилась возможность не только повторно воспроизводить принятую и зарегистрированную ТМ-информацию, изменяя в случае необходимости масштаб по шкале времени или по шкале значений телеметрируемых параметров при

представлении результатов обработки в виде графиков, что позволяло получить дополнительную информацию (например, информацию на интервалах быстрых и непредвиденных изменений телеметрируемых параметров), но и возможность повысить оперативность обработки ТМ-информации (по сравнению с фотопленкой), улучшить условия для автоматизации действий над ней.

На основе полученного опыта и в условиях стремительного развития электронно-вычислительной техники и информационных технологий стало актуальным использование универсальных электронно-вычислительных машин (ЭВМ) и прилагаемого к ним программного обеспечения при построении ПТС автоматизированной обработки ТМ-информации вместо специальных вычислительных устройств (типа вышеупомянутых «Старт» и МО-9).

В 1962 г. началась, а к середине 1960-х годов завершилась разработка новой системы обработки ТМ-информации «Лотос» на базе универсальной ЭВМ «Урал-11» [15].

В 1980-е годы на смену комплексу «Лотос» пришли комплексы обработки ТМ-информации ВЛ-1033-01, позднее — ВЛ-1045-01 с ЭВМ, включенными в их состав — ЕС-1033 и более производительные ЕС-1045 соответственно.

Несколько парадоксальным выглядит увеличение объема ПТС в составе телеметрического комплекса космодрома в 1960–1980-е годы на фоне развития элементной базы (лампы — полупроводники — микросхемы), поскольку расширение функциональных возможностей телеметрического комплекса космодрома осуществлялось за счет дополнительной аппаратуры. Так, для обработки ТМ-информации структуры БРС-4 на аппаратуре МО-9 и позднее на системе «Лотос» требовалось ее кодопреобразование в структуру РТС-9. Для этого применялась аппаратура СП4-9 [15] и позднее «Спектр-Б1». Для обработки ТМ-информации быстроменяющихся параметров структуры БРС-4 применялась специализированная аппаратура «Спектр-А0» и позднее «Квант-3А» и т. д.

Иной аспект, связанный с увеличением объема в составе телеметрического комплекса космодрома и проявившийся при подготовке космодрома Байконур к летным испытаниям комплекса «Энергия — Буран», касается поведенческой неопределенности [12], человеческого фактора, приведших в итоге к выбору худшей стратегии дооснащения телеметрического комплекса космодрома средствами, связанными с радиотелеметрической системой БРС-4, а не «Орбита» [14]. В данном случае подтверждается актуальность совершенствования управления (регламентирования) [1–6] развитием отечественных систем ИТМ-обеспечения обработки средств выведения.

Увеличению объема аппаратных (технических) средств в составе телеметрического комплекса космодрома в 1960–1980-е годы, кроме расширения его функциональных возможностей за счет дополнительной аппаратуры, способствовали их конструктивные особенности. Так, например, модификации приемно-регистрирующих станций БРС-4М, БРС-4МК на микросхемах, поступившие на космодром Байконур в середине 1970-х — 1980-е годы, по массе и габаритам превосходили их более ранние аналоги (на лампах) — в них до 50 % всей аппаратуры составляли блоки питания и стабилизации напряжения, необходимые для обеспечения нужных режимов электропитания микросхем. Комплекс обработки ТМ-информации ВЛ-1045-01, кроме универсальной ЭВМ ЕС-1045, содержал (в зависимости от поставленного комплекта) примерно 14 устройств; вся аппаратура размещалась на площади 260 м², потребляла 100 кВА электроэнергии, а численность обслуживающего персонала одной смены составляла 15 чел. Учитывая, что вычислительный центр космодрома в то время работал в три смены, для обслуживания одного комплекса ВЛ-1045-01 требовалось (с учетом взаимозаменяемости, всяких уплотнений графика работ и т. д.) около 40 чел. Материальные затраты, связанные с эксплуатацией комплекса ВЛ-1045-01 в вычислительном центре космодрома, значительно превосходят аналогичные затраты, по комплексу «Лотос».

Рассмотренное увеличение объема аппаратных (технических) средств в составе телеметрического комплекса космодрома в 1960–1980-е годы совпало с его дооснащением в середине 1970–1980-х годов для ИТМ-обеспечения летных испытаний комплекса «Энергия — Буран» на космодrome Байконур [14], усугубив ситуацию (значительно увеличилось количество разнотипной аппаратуры в составе телеметрического комплекса космодрома [14]). При этом значительная часть ПТС телеметрического комплекса космодрома, задействуемая при пуске ракет-носителей типа «Энергия», оказывалась излишней (избыточной) в случае чаще всего запускаемых ракет-носителей типа «Союз».

На увеличение объема ПТС телеметрического комплекса космодрома повлиял также человеческий фактор (поведенческая неопределенность [12], групповой эгоизм [17]), связанный с выгодами от расширения предприятия/организации (от роста численности обслуживающего персонала, создания новых рабочих мест, новых подразделений и, соответственно, более высоких и более оплачиваемых руководящих должностей и т. д.).

В 1990-е годы на фоне прекращения работ, связанных с пусками ракеты-носителя «Энергия», избыточность существующих ПТС телеметриче-

ского комплекса космодрома стала очевидной. В это же время в полной мере проявились подрывные технологии, обеспечивающие построение ПТС телеметрического комплекса космодрома на базе персональных ЭВМ (ПЭВМ) и с применением безбумажной [18] технологии обработки телеметрической информации.

Построение ПТС телеметрического комплекса космодрома на базе ПЭВМ позволило существенно снизить материальные затраты на обслуживающий персонал (благодаря уменьшению его численности), электроэнергию. Вследствие значительного уменьшения массы и габаритов ПТС телеметрического комплекса космодрома соответственно, уменьшилась площадь машинных залов, технических сооружений для их размещения и для размещения обслуживающего персонала. Применением ПТС телеметрического комплекса космодрома на базе ПЭВМ созданы благоприятные условия для осуществления безбумажной [18] технологии обработки ТМ-информации.

Приведем (для краткости) лишь некоторые примеры, иллюстрирующие преимущества введения ПЭВМ в состав ПТС телеметрического комплекса космодрома.

Разработанная в 1998–1999 годы ПРС «Опал» [19] обеспечивала приеморегистрацию ТМ-информации структур радиотелеметрических систем типа РТС-9 и БРС-4, накапливая ее на жестком, а также (по необходимости) на оптических и магнитооптических дисках. Отпала необходимость в громоздких магнитных регистраторах, массивных и многочисленных кассетах магнитной ленты для записи ТМ-информации. Масса и габариты ПРС «Опал» [19] позволили разместить ее на обычном письменном столе, ее энергопотребление было соизмеримо с энергопотреблением комплекта ПЭВМ и с ее применением по целевому назначению справлялся один оператор.

Другой пример — комплекс сбора и обработки ТМ-информации «Родник» [19, 20]. На период замены ПРС, изготовленных в середине 1970-х — в 1980-е годы, (типа МА-9МКТМ-1 и МА-9МКТМ-4, БРС-4М и БРС-4МК) ПРС на базе ПЭВМ (типа «Опал») для обеспечения ввода ТМ-информации от приемно-регистрирующей станции в ПЭВМ комплекса «Родник» (т. е. для согласования комплекса «Родник» с ПРС) применялся модуль М2081 [21], а для ее передачи от комплекса «Родник» по каналам связи в качестве модема — модуль М2181Е1 [22]. Как и в случае с ПРС «Опал», комплекс «Родник» размещался на обычном столе, а работа на нем осуществлялась силами одного оператора (как на обычной ПЭВМ). По окончании перехода на приемно-регистрирующие станции на базе ПЭВМ (типа «Опал») отпала необходимость в

модулях М2081 и М2181Е1. Комплексы сбора и обработки ТМ-информации трансформировались в компьютерные сети с наличием специфического программного обеспечения для осуществления действий над ТМ-информации.

С внедрением ПТС на базе ПЭВМ в состав телеметрического комплекса космодрома в 1990-е — 2000-е годы принципиально изменилась технология управления и контроля за их функционированием, а также контроля качества принимаемой ими ТМ-информации. Возможности пользовательского интерфейса позволили осуществлять управление и контроль за функционированием ПТС телеметрического комплекса космодрома нажатием кнопок, отображаемых на экране монитора, ставшим альтернативой нажатию на многочисленные кнопки на передних панелях аппаратуры ПСТ до 1990-х годов. Кроме того, стал возможен контроль качества принимаемой ТМ-информации посредством вывода на монитор, в частности, результатов представления контролируемой ТМ-информации в виде графиков контрольных параметров, что стало альтернативой средствам визуального контроля с использованием встроенных в стойки осциллографов других измерительных приборов (ныне морально устаревших).

Компактные ПСТ телеметрического комплекса космодрома на базе ПЭВМ (типа вышеупомянутых ПРС «Опал» и комплекса обработки ТМ-информации «Родник») могут быть легко доставлены к новому месту и там оперативно развернуты (т. е. подготовлены к применению по целевому назначению). Значительное сокращение энергопотребления позволило применять источники бесперебойного питания, что повысило надежность электропитания ПТС телеметрического комплекса космодрома. Отпала необходимость, например, в дизельных электростанциях, размещаемых ранее на измерительных пунктах, к которым подключали ПРС примерно за один час до пуска в целях обеспечения надежного электропитания во время пуска (в полетное время). Существенно расширились возможности построения мобильных измерительных комплексов [19].

Внедрением программно-технических средств на базе ПЭВМ в состав телеметрического комплекса космодрома и переходом на безбумажную [18] технологию обработки ТМ-информации не только дали возможность достичь преимуществ, но и обусловили издержки, связанные со спешным сокращением высвободившегося обслуживающего персонала и необходимостью подготовки работников по новым специальностям. Потребовалась утилизация выведенных из эксплуатации морально и физически устаревших ПТС телеметрического комплекса космодрома, принятие

мер по освободившимся площадям машинных залов и технических зданий (сооружений). При этом крайне малы возможности приспособить к новым требованиям освободившееся техническое здание, расположенное на охраняемой территории и на удаленном от населенных пунктов расстоянии. Зачастую сложно определить, какой путь экономически более выгоден: реконструировать существующие сооружения или построить новые технические здания (по современным технологиям, с использованием современных строительных материалов). Для того, чтобы аналогичные издержки не проявлялись в дальнейшем, необходимо управление развитием систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения, обеспечить своевременным и результативным противодействием подрывным технологиям.

Некоторые аспекты безбумажной технологии обработки ТМ-информации. Поясним некоторые аспекты безбумажной [18] технологии обработки ТМ-информации, используемой при решении задач ИТМ-обеспечения отработки средств выведения.

При представлении результатов обработки ТМ-информации в виде графиков относительно часто возникает необходимость изменения масштаба шкал времени (чаще всего) или значений телеметрируемых параметров на каких-либо временных интервалах. Это обусловлено недостаточными знаниями о поведении телеметрируемых параметров априори. В случае представления графиков на бумажном носителе (как это было до внедрения безбумажной технологии) и функционирования телеметрируемых параметров, отличающегося от ожидаемого, возникает необходимость в переделке графиков с измененной скоростью движения бумаги в графическом устройстве, задаваемой с поправкой на функционирование телеметрируемых параметров. Переделку графиков и таблиц следует осуществлять по заявкам, выдаваемым специалистами подразделений анализа (анализаторами) специалистам-обработчикам вычислительного центра космодрома, которые, по сути, являются посредниками между ПТС обработки ТМ-информации и анализаторами. Следствием итерационного взаимодействия между анализаторами и обработчиками было существенное увеличение сроков обработки ТМ-информации (табл. 1 и 2).

Следует уточнить, что, наряду с ошибками в выборе масштаба шкал времени или значений телеметрируемых параметров повторная обработка обусловлена низкой достоверностью исходных телеметрических измерений для формирования обобщенного массива данных телеизмерений, несовершенством технологии этого формирования, вследствие чего необходим поиск наиболее досто-

верных телеизмерений среди зарегистрированных [1]. В случае безбумажной технологии каждый вывод результатов обработки ТМ-информации на монитор требует некоторого времени на осмысление и принятие решения анализатором. Такое (специфическое) взаимодействие анализатора с ПТС обработки ТМ-информации снижает оперативность решения задач ИТМ-обеспечения, а границы между решением задач ИТМ-обеспечения и задач анализа становятся весьма размытыми.

Наряду с существенным повышением оперативности решения задач ИТМ-обеспечения, использование безбумажной технологии обработки ТМ-информации позволило значительно снизить материальные затраты, связанные с использованием электрохимической бумаги для изготовления графиков и бумаги алфавитно-цифрового печатающего устройства для изготовления таблиц (на необходимое документирование результатов обработки ТМ-информации с использованием обычного принтера требуется относительно малое количество листов бумаги формата А4).

Принципиальная степень улучшения общих (обобщенных) показателей развития систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения. Для того, чтобы корректно сформулировать рекомендации по управлению развитием систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения в условиях риска проявления подрывных технологий, важно знать, до какой степени показатели (см. формулу (2)) развития систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения могут быть улучшены в принципе, как это улучшение отразится на облике ПТС систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения (ПТС телеметрического комплекса космодрома), к каким форс-мажорным ситуациям это может привести.

Кроме *радикальных* изменений общих (обобщенных) показателей (см. формулу (2)), форс-мажорные ситуации проявляются в виде существенных изменений производственных отношений, когда возникает необходимость в значительных изменениях организационно-штатной структуры предприятий/организаций ракетно-космической отрасли вследствие «отмирания» некоторых специальностей (высококвалифицированные кадры этих специальностей оказываются невостребованными, и их рабочие места попадают под сокращение) и в новых специалистах, на подготовку которых требуется время, к тому же существенно изменяется структура материальных, денежных трат, связанных с системами ИТМ-обеспечения отработки средств выведения.

Рассмотрим некоторые аспекты *идеальной* системы ИТМ-обеспечения отработки средств выведения [1] (см. рисунок), связанные с показателями в выражениях (2) и (3).

Т а б л и ц а 1

Статистические сведения, полученные при испытании ракеты-носителя «Энергия», характеризующие процесс выполнения дополнительных заявок на обработку телеметрической информации

Statistical data obtained during testing of the Energia rocket vehicle, characterising the process of fulfilling additional requests for telemetry data processing

Номер заявки	Время с момента пуска, сут.	Затраты машинного времени, ч	Количество параметров в заявке	Номер заявки	Время с момента пуска, сут.	Затраты машинного времени, ч	Количество параметров в заявке	Номер заявки	Время с момента пуска, сут.	Затраты машинного времени, ч	Количество параметров в заявке
1	5	2,8	30	10	15	3,0	16	19	22	1,1	4
2	12	1,0	40	11	16	0,8	34	20	22	0,5	3
3	13	0,5	24	12	16	0,7	4	21	23	0,5	6
4	14	2,0	144	13	16	0,5	1	22	23	1,5	6
5	14	1,5	32	14	17	2,3	24	23	23	1,0	21
6	14	1,0	6	15	18	0,8	24	24	31	2,0	24
7	14	1,0	16	16	18	0,7	4	25	31	0,5	2
8	15	1,0	16	17	22	2,8	20	26	31	1,0	3
9	15	0,5	6	18	22	1,7	32	27	43	1,5	6
Итого:										34,0	548

Т а б л и ц а 2

Статистические сведения о полной обработке телеметрической информации параметров движения ракеты-носителя «Союз»

Statistical data on complete processing of telemetry information of Soyuz rocket vehicle motion parameters

Номер испытания	Количество графиков	Количество таблиц	Номер испытания	Количество графиков	Количество таблиц	Номер испытания	Количество графиков	Количество таблиц	Номер испытания	Количество графиков	Количество таблиц
1	35	40	4	40	45	7	50	44	10	50	37
2	26	35	5	49	50	8	38	48			
3	38	38	6	35	30	9	39	38			
Изготовлено в среднем										40,0	40,5
Представлено в отчет										10	20

1. *Радикальное* улучшение возможностей сокращения потерь информации (или получения дополнительной информации) о телеметрируемом объекте (ТМ-объекте) в сформированных обобщенных данных телеизмерений [1], которое повышает, соответственно, возможности анализа (особенно в случае возникновения полетной аварии на ТМ-объекте). Информация касается показателя $\Delta W_{эф. И_{ан}} \Sigma$ (3).

Достаточно полно (с нашей точки зрения) вопросы получения дополнительной информации (или сокращения потерь информации) в обобщенных данных телеизмерений, роли и места ТМ-информации, ее достаточности для решения задач анализа рассмотрены в работе [1].

Положим, что обеспеченное радикальное увеличение информации в обобщенных данных телеизмерений идеальной системы ИТМ-обеспечения отработки средств выведения создаст условия для получения (после соответствующей обра-

ботки этих данных) любых нужных с точки зрения анализа данных результатов обработки ТМ-информации, в том числе в случае возникновения полетной аварии на ТМ-объекте.

Важно знать, интересы каких специалистов затрагивает радикальное дополнение информации, чтобы определить, каким образом будут востребованы результаты усовершенствования системы ИТМ-обеспечения отработки средств выведения, полученные в результате проявившихся соответствующих подрывных технологий, как они отразятся на функционировании предприятий/организаций ракетно-космической отрасли.

Радикальные улучшения, касающиеся показателя $\Delta W_{эф. И_{ан}} \Sigma$ (3), расширяют возможности использования ТМ-информации по целевому назначению, поэтому наиболее значимо влияют на функционирование подразделений анализа. Однако это влияние отчасти ослабляется следующими обстоятельствами.

Показано [1], что ТМ-информации является лишь частью информации, используемой для решения задач анализа (полезный эффект от прорыва в области телеметрии будет лишь частью полезного эффекта, связанного со всей информацией, используемой при решении задач анализа).

Показано [1], что решение задач анализа в значительной мере связано с мыслительной деятельностью анализатора. Зачастую в ходе анализа требуется осмысление данных результатов обработки ТМ-информации, особенно в случае установления причин полетной аварии на *ТМ-объекте*, когда руководящие документы (методики, инструкции и т. д.), регламентирующие работу анализаторов, далеко не в полной мере помогают — актуален творческий подход к процессу анализа. Отсюда относительно много проявлений субъективного, связанного с так называемым человеческим фактором.

От получения дополнительных сведений о *ТМ-объекте* следует ожидать уменьшения вероятности ошибочных заключений, ошибочных оценок, касающихся функционирования объектов анализа (элементов и систем *ТМ-объекта*), однако сомнительно, что это приведет к количественному увеличению объектов анализа, приходящихся на одного анализатора. Зоны ответственности каждого анализатора, ограниченные человеческими возможностями знания сущностей объектов анализа, в этой связи вряд ли расширятся или сузятся (т. е. количество объектов анализа, приходящихся на одного анализатора, вряд ли изменится в обозримой перспективе).

Из представленного выше краткого анализа следует, что форс-мажорные (с нашей точки зрения) ситуации, обусловленные последствиями *радикального* улучшения, касающегося показателя $\Delta W_{\text{эф. } W_{\text{ан. } \Sigma}$ (3), скорее всего, не возникнут. Судя по всему, в текущей перспективе в направлении, связанном с показателем $\Delta W_{\text{эф. } W_{\text{ан. } \Sigma}$ (3), ожидается процесс развития систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения без форс-мажорных всплесков активности.

2. *Радикальное* повышение оперативности решения задач ИТМ-обеспечения системой ИТМ-обеспечения отработки средств выведения, касающееся показателя $\Delta W_{\text{эф. } T_{\text{прим}}}$ (3).

Необходимым условием повышения оперативности решения задач анализа с использованием данных результатов полной (первичной и вторичной) обработки ТМ-информации [23, 24] является соответствующее повышение оперативности получения обобщенных данных телеизмерений, обязательно используемых при решении задач их полной обработки (см. рисунок).

Максимальная оперативность получения обобщенных данных телеизмерений возможна

в случае осуществления формирования обобщенного массива данных телеизмерений в темпе формирования ТМ-информации в *бортовой радиотелеметрической системе* (на *ТМ-объекте*) с поправкой на временную задержку вследствие передачи ТМ-информации по каналам «борт — Земля» и вследствие осуществления собственно формирования обобщенного массива данных телеизмерений (в частности, при осуществлении управляемого разнесенного приема ТМ-информации [1] задержка может составлять единицы секунд).

Специфика решения задач ИТМ-обеспечения такова (см. рисунок), что процесс обработки ТМ-информации подразделяется на два этапа обработки: 1) оперативная; 2) полная [23, 24]. В свою очередь, каждый из этих этапов имеет фазы первичной и вторичной обработки [23, 24]. В терминах вычислительного центра космодрома фазы оперативной обработки ТМ-информации — экспресс-обработка и, собственно, оперативная обработка. Экспресс-обработка осуществляется параллельно поступлению ТМ-информации (в так называемом реальном масштабе времени), также оперативно решаются задачи экспресс-анализа. Задачи оперативной обработки (и, соответственно, оперативного анализа) обычно решают в течение примерно 3 ч после пуска (это время может изменяться в зависимости от типа *ТМ-объекта*, степени его отработанности, от успешности пуска). Для решения задач экспресс- и оперативной обработки ТМ-информации в вычислительный центр космодрома обычно передают часть ТМ-информации, а для решения задач ее полной обработки используют данные телеизмерений обобщенного массива (т. е. полная обработка ТМ-информации осуществляется после формирования обобщенного массива данных телеизмерений). В этой связи показано [1], что допустимое время формирования обобщенного массива данных телеизмерений составляет около 3 ч (ужесточать эти требования не имеет смысла).

Деление процесса обработки ТМ-информации (и, соответственно, процесса анализа) на этапы и фазы обусловлено ограниченными возможностями не только применяемых систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения, но и анализаторов, ограничениями их зон ответственности (т. е. человеческим фактором). Можно представить (допустим, в перспективе) формирование обобщенного массива данных телеизмерений в реальном масштабе времени и использование обобщенных данных телеизмерений при решении задач их экспресс- и оперативной обработки для получения любых требуемых анализаторами данных результатов этой обработки. Однако процесс анализа, по сути, является итерационным

процессом вследствие необходимости периодического осмысления анализаторами полученных данных результатов обработки ТМ-информации. Если исходить из предположения, что вследствие совершенствования технологии обработки ТМ-информации (например, реализацией новых методов и алгоритмов ее формирования на *ТМ-объекте*) уменьшится объем сведений, выводимых анализаторами на монитор при решении ими задач анализа, и, соответственно, повысится качество анализа (сократится время анализа, уменьшится вероятность ошибочных решений/заключений), то итерационная суть процесса анализа (диалога анализатора с компьютером) останется неизменной. Это предположение подтверждается, в частности, успешным развитием методов идентификации различных состояний систем [25] и результатами применения разработанных на их основе [26, 27] методов идентификации различных состояний *ТМ-объекта* в полетное время (т. е. вышеупомянутые методы [26, 27] успешно применяют при пусках отечественных ракет-носителей для решения задач экспресс-обработки ТМ-информации и последующего экспресс-анализа).

Следует заметить, что высокая оперативность получения обобщенных данных телеизмерений при осуществлении одного из разработанных [1] методов управляемого разнесенного приема ТМ-информации (временная задержка может составлять единицы секунд) обеспечивается не в целях повышения оперативности, а для сокращения потерь ТМ-информации (оперативность здесь «побочный эффект»).

Как и в предыдущем случае (с показателем $\Delta W_{\text{эф}_W\text{ан}_\Sigma}$ (3)), радикальные улучшения, касающиеся показателя $\Delta W_{\text{эф}_T\text{прим}}$ (3), скорее всего, не станут причиной возникновения форс-мажорных (с нашей точки зрения) обстоятельств.

3. Радикальное сокращение материальных затрат на решение задач ИТМ-обеспечения рассматриваемой системой, касающееся показателя $\Delta W_{\text{эф}_C\text{прим}}$ (3).

Целесообразно рассмотреть сокращение материальных затрат $\Delta C_{\text{прим}}$ (2), соответствующее показателю $\Delta W_{\text{эф}_C\text{прим}}$ (3), опосредовано через изменения следующих составляющих:

- массы ПТС, габаритов;
- требуемой площади зала для размещения ПТС и обслуживающего персонала;
- энергопотреблением;
- численностью обслуживающего персонала.

В этой связи на уровне грубых экспертных оценок (на концептуальном уровне) рассмотрены радикальные изменения вышеупомянутых опосредованных параметров и ожидаемые последствия этих изменений. Логично ожидать, что сохранятся тенденции развития ПТС, описанные

законом Мура [28], связанные с уменьшением их массы и габаритов, с ростом их вычислительных возможностей, что будет все более «дружественным» пользовательский интерфейс. Логичные последствия таких тенденций — соответствующие изменения облика и возможностей отдельных ПТС телеметрического комплекса космодрома. Например, уменьшение ПРС до размеров и массы небольшого ноутбука или даже смартфона, создание соответствующего возможностям ноутбука (смартфона) пользовательского интерфейса с функциями управления работой ПРС и контроля принимаемой/принятой ТМ-информации, относительно продолжительное время работы от внутреннего источника электроэнергии без его подзарядки.

При подключении к этой предполагаемой ПРС относительно малогабаритной, но обеспечивающей требуемое отношение сигнал/шум антенной системы (тенденции к построению малогабаритных антенн наблюдаются; благоприятные условия их построения могут быть обеспечены, например, использованием более высокочастотного диапазона несущих частот), а также при обеспечении широких возможностей передачи принятой и накопленной/зарегистрированной ею ТМ-информации по широкополосным каналам связи (например, при решении задач сбора ТМ-информации [1] с использованием низкоорбитальных спутников-ретрансляторов или с использованием технологий сети Internet) ожидаемы и также логичны изменения облика и возможностей измерительных пунктов и вычислительного центра космодрома (т. е. телеметрического комплекса космодрома в целом). Судя по всему, показанные сущности ожидаемой в перспективе ПРС (*идеальной* — с учетом принятых допущений) могут быть отнесены и к другим отдельным ПТС телеметрического комплекса космодрома и к внешним ПТС по отношению к телеметрическому комплексу космодрома, актуальным при решении задач ИТМ-обеспечения.

Следствием внедрения в состав телеметрического комплекса космодрома ПТС на базе ПЭВМ являются относительно малые площади технических сооружений для их размещения, отсутствие дизельных электростанций (и, соответственно, сооружений для их размещения) для перевода на автономное электропитание ПТС измерительных пунктов во время пуска (для надежного электропитания достаточно источников бесперебойного питания). Кроме того, работа персонала измерительных пунктов сводится к операторской работе (упрощенному контролю качества принимаемой/принятой ТМ-информации). Оператор ПЭВМ в настоящее время не должен устранять неисправности, например, заменять транзистор или

микросхему и т. д. Подразделения вычислительного центра, в обязанности которых (до внедрения безбумажной технологии обработки ТМ-информации) входила эксплуатация технических (аппаратных) средств, стали не нужными — появились подразделения, осуществляющие регламентные работы, ремонт ПТС централизованно. Коренным образом изменилась специфика работы специалистов — обработчиков ТМ-информации в вычислительном центре космодрома, характер их взаимодействия с анализаторами.

Следует ожидать дальнейшее (в некоторой мере естественное) сокращение материальных затрат $\Delta C_{\text{прим}}$ (2) за счет удешевления ПТС (см. закон Мура [28]), улучшения их эргономических свойств и т. д. Такое развитие систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения находится вне влияния подрывных технологий. Как показывает практика, именно *радикальное* сокращение материальных затрат, соответствующих показателю $\Delta W_{\text{эф}_C\text{-прим}}$ (3), может породить форс-мажорные ситуации в ходе развития отечественных систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения.

Ожидаемая трансформация элементов систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения в недалекой перспективе. В 2000-е годы завершился переход на безбумажную [18] технологию обработки ТМ-информации, и к настоящему времени процесс развития отечественных систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения (внедрение новых методов и алгоритмов действий, информационных технологий) приобрел по сути экстенсивный характер. Имеют место локальные улучшения элементов систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения, связанные с общими тенденциями развития ПТС и информационных технологий, необходимостью создания программного обеспечения для решения новых текущих задач ИТМ-обеспечения. В зависимости от траектории полета *ТМ-объектов*, опосредованных через зоны радиовидимости, создаются новые измерительные пункты, меняется состав ПТС, размещаемый на существующих измерительных пунктах (соответственно, изменяется численность обслуживающего персонала, площадь технических зданий). Для такого (экстенсивного по сути) характера развития систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения не важно дальнейшее уменьшение массы и габаритов ПТС телеметрического комплекса космодрома (на фоне масштабов уменьшения площадей технических сооружений комплекса космодрома, связанных с переходом на ПТС на базе ПЭВМ), снижение (и без того относительно экономного) энергопотребления и т. д. Доминируют негласные принципы развития отечествен-

ных систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения типа «от добра добра не ищут», «лучшее — враг хорошего».

В то же время ныне существуют принципиальные и не реализованные возможности для улучшения систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения, связанные с подрывными технологиями. Они, образно выражаясь, являются «миной замедленного действия».

Уже сегодня существуют широкие возможности построения подвижных измерительных комплексов (автомобильных, авиационных, корабельных) с использованием преимуществ не только самих ПТС, но и новых средств передвижения для этих подвижных измерительных комплексов. Для размещения ПТС под задачи ИТМ-обеспечения не требуются корабли большого водоизмещения, введенные в эксплуатацию в 1960–1980-е годы. В настоящее время ПТС можно разместить на относительно малой части корабля или даже в установленном на нем контейнере (работы в этом направлении ведутся), что позволяет обеспечивать многофункциональность корабля. Современные технологии позволяют в недалекой перспективе построить беспилотный корабельный измерительный комплекс.

Новые возможности открываются и в построении авиационных измерительных комплексов, причем их реализация не связана только с массой, габаритами и другими параметрами ПТС, размещаемых на борту летательного аппарата, что уже является значительным преимуществом, в частности, дает возможность взять на борт дополнительное топливо, чтобы существенно продлить время и расстояние беспосадочного полета. Открывающиеся возможности связаны также с достижениями в современном авиационном, позволяющими летать дальше, дольше и без дозаправки (или с дозаправкой в воздухе); с достижениями в области построения и применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Предполагаемое внедрение беспилотных подвижных измерительных комплексов потребует новых условий для их применения по целевому назначению. Возникнет необходимость в специалистах по дистанционному управлению и контролю за беспилотными подвижными измерительными комплексами, понадобятся соответствующие пункты управления и контроля, новые элементы системы сбора ТМ-информации, совмещаемые с ныне существующей системой сбора.

Возможности включения одних и тех же подвижных измерительных комплексов в состав различных систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения в качестве внешних ПТС позволяют дополнять ПТС телеметрического комплекса космодрома (ПТС измерительных пунктов),

относительно оперативно изменять конфигурацию соответствующих систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения, обслуживая при этом по необходимости пуски с разных (с нескольких) космодромов этими подвижными измерительными комплексами. Неизбежно возникнут организационные вопросы, касающиеся их эксплуатации (применения по целевому назначению). Возможно, для этого будут созданы организации/предприятия в составе ракетно-космической отрасли или — аутсорсинговые — вне ракетно-космической отрасли. Возникнет необходимость в профессионалах новых специальностей, скорее всего, потребуются значительные изменения организационно-штатной структуры организаций/предприятий, функции которых связаны с системами ИТМ-обеспечения отработки средств выведения.

На различных (гипотетических) подвижных измерительных комплексах и связанных с ними (вероятных) организационно-технических мерах проявляется влияние подрывных технологий, которое заключается в ожидаемых *радикальных* изменениях, касающихся развития систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения.

Новые возможности открываются в построении и применении временных измерительных пунктов, причем они касаются не только преимуществ современных ПТС и информационных технологий, но и новых материалов и технологий, позволяющих возводить сооружения временных измерительных пунктов по типу полевых госпиталей (т. е. с массой и габаритами оборудования временного измерительного пункта, позволяющими без больших материальных затрат доставлять их в нужное место, относительно быстро развертывать, причем в неподготовленных и необорудованных местах, обеспечивать комфортные условия жизнедеятельности обслуживающего персонала).

Рассмотренные возможные перспективы развития временных измерительных пунктов придают актуальность новым подходам к развитию перебазированных комплексов (ПТС и обслуживающий персонал размещаются в специальных контейнерах), поскольку перебазированный комплекс — это, по сути, фрагмент временного измерительного пункта.

При относительно малых массе и габаритах ПТС временного измерительного пункта, перебазированного комплекса и при относительно малочисленном обслуживающем персонале доставка ПТС к максимально близкому месту выполнения целевой задачи может осуществляться обычными рейсовыми самолетами, по железной дороге или другими видами транспорта, размещая оборудование в багажном отделении транспортного средства либо как ручную кладь.

Как и в случае с подвижными измерительными комплексами, дальнейшее развитие временных измерительных пунктов и перебазированных комплексов, причем в качестве альтернативы существующим измерительным пунктам, другим (существующим и предполагаемым) элементам систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения, создает предпосылки *радикальных* перемен организационно-технического характера, касающихся развития этих систем, как следствие влияния подрывных технологий.

Следует отметить, что созданы условия для *радикальных* изменений сущностей существующих измерительных пунктов (пристартовых и трассовых), связанных с все большей автоматизацией управления и контроля за их функционированием, с возможностями перехода на дистанционные управление и контроль. При такой перспективе развития возможно значительное сокращение обслуживающего персонала измерительных пунктов. Измерительные пункты может обслуживать относительно малочисленный персонал или автоматическим путем, с изменением численности персонала по мере необходимости, в зависимости от решения текущих задач ИТМ-обеспечения. Могут потребоваться пункты управления и контроля за ПТС измерительных пунктов, а также персонал для их обслуживания.

Судя по практике применения системы Starlink (и ее аналогов), может стать актуальным включение в состав систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения в качестве внешних ПТС низкоорбитальных связных спутников-ретрансляторов, что (как следствие влияния подрывных технологий) *радикально* изменит технологию приема-регистрации и сбора ТМ-информации и, соответственно, внесет *радикальные* организационно-технические изменения в развитие этих систем.

Кроме того, имеются предпосылки возникновения экстремальных (форс-мажорных) ситуаций вследствие вынужденного интенсивного подхода к развитию отечественных систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения, обусловленных проявлением соответствующих подрывных технологий, требующих неотложных мер по *радикальному* изменению сущностей этих систем. Для того, чтобы избежать возникновения подобных ситуаций, необходима работа на упреждение, направленная на приближение общих (обобщенных) показателей развития систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения к *идеальным* показателям. В ее основе лежат разработка и внедрение методов и алгоритмов действий над ТМ-информацией, структур сигналов/данных, ее содержащих, которые обеспечили бы соответствующее управление избыточностью данных телеизмерений систем ИТМ-обеспечения отработки средств выведения [1].

Выводы

Следствием влияния подрывных технологий на развитие систем ИТМ-обеспечения обработки средств выведения является вынужденный интенсивный подход к их развитию: внедрение в их состав принципиально новых ПТС, создание условий для их функционирования, подготовка квалифицированного персонала по новым специальностям, соответствующие (и значительные) изменения организационно-штатной структуры предприятий/организаций, участвующих в их развитии.

Индикатором влияния подрывных технологий являются общие (обобщенные) показатели операций усовершенствования и применения данных систем, характеризующиеся *радикальными* изменениями материальных затрат, оперативностью решения задач ИТМ-обеспечения и потерями телеметрической информации. При этом наиболее важным поводом для применения интенсивного подхода к развитию данных систем могут служить ожидаемые *радикальные* сокращения материальных затрат на применение усовершенствованной системы ИТМ-обеспечения обработки средств выведения.

Чем ближе по уровню развития текущая система ИТМ-обеспечения обработки средств выведения к *идеальной*, тем менее значительны ее улучшения, характеризующие общими (обобщенными) показателями, тем меньше издержки от проявления подрывных технологий (в некоторой мере оценки *идеальности* субъективны и характеризуют цель, касающуюся развития данных существующих систем. Степень достижения цели характеризует уровень ущерба при проявлении подрывных технологий.

Технические аспекты дальнейшего развития данных систем касаются прежде всего разработки и внедрения методов и алгоритмов действий над ТМ-информацией, структур сигналов/данных, ее содержащих, которые обеспечивают управление избыточностью данных телеизмерений при осуществлении стратегий усовершенствования и применения систем ИТМ-обеспечения обработки средств выведения, *существенно* улучшают общие (обобщенные) показатели их развития, приближают их к показателям *идеальной* системы.

Для снижения рисков издержек вследствие влияния подрывных технологий необходимо принять организационно-технические меры, направленные на улучшение управления развитием отечественных систем ИТМ-обеспечения обработки средств выведения, связанные с регламентированием их развития. При этом инструментами регламентирования являются прежде всего концепция развития отечественных систем

ИТМ-обеспечения обработки средств выведения и *система* стандартов телеметрии, соответствующая требованиям этой концепции.

Для поддержания совершенствования концепции и *системы* стандартов телеметрии необходима рабочая группа квалифицированных разносторонних специалистов-экспертов на предприятиях/организациях ракетно-космической отрасли, которая бы обеспечивала результативное использование созидательных возможностей предприятий/организаций посредством участия в управлении политикой научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области развития данных систем. В ведении такой рабочей группы должны находиться работы по мониторингу развития подрывных технологий, имеющих отношение к данным системам, от момента их зарождения до полноценной практической реализации и выработки эффективных упреждающих мер по купированию связанных с ними угроз. При формировании рабочей группы (подборе специалистов, желающих и способных работать в этой сфере) следует учитывать тенденции уменьшения численности работников, решающих задачи, связанные с системами ИТМ-обеспечения обработки средств выведения.

Список литературы

- [1] Воронцов В.Л. Система информационно-телеметрического обеспечения обработки средств выведения. Стратегии усовершенствования и применения. М.: Горячая линия — Телеком, 2021. 236 с.
- [2] Воронцов В.Л., Давыдов И.А. Регламентирование процесса развития систем информационно-телеметрического обеспечения обработки средств выведения // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2021. Т. 8. Вып. 2. С. 43–50.
- [3] Воронцов В.Л., Давыдов И.А., Медведев Е.В. Подходы к регламентированию процесса развития средств информационно-телеметрического обеспечения обработки объектов ракетно-космической техники // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2022. Т. 9. Вып. 1. С. 42–54.
- [4] Воронцов В.Л., Давыдов И.А. Регламентирование процесса развития систем информационно-телеметрического обеспечения обработки средств выведения на всех этапах их жизненного цикла // Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники: Материалы V Всерос. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 09–10 декабря 2021 г. Санкт-Петербург: Изд-во Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, 2022. С. 77–84.
- [5] Воронцов В.Л., Давыдов И.А. Концептуальные направления реализации принципа «наука — практика» в развитии отечественных систем информационно-телеметрического обеспечения обработки средств выведения // Информационно-управляющие и измерительные системы — 2023: Материалы отраслевой науч.-техн. конф. приборостроительных организаций Госкорпорации «Роскосмос», посвященной 60-летию

- полета первой женщины-космонавта В.В. Терешковой, Москва, 20 апреля 2023 г. М.: Изд-во Роскосмос, 2023. С. 9–17.
- [6] Воронцов В.Л., Давыдов И.Д. Концепция развития систем информационно-телеметрического обеспечения отработки средств выведения // Радиозлектронная отрасль: проблемы и их решения, 2023. № 3 (11). С. 24–32.
- [7] Надежность и эффективность в технике: справочник. В 10 т. М.: Машиностроение. Т.1: Методология. Организация. Терминология / под ред. А.И. Рембезы. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.
- [8] ГОСТ 19619–74. Оборудование радиотелеметрическое. Термины и определения. М.: Стандартиформ, 2005. 20 с.
- [9] Кристенсен К.М. Дилемма инноватора. Как из-за новых технологий погибают сильные компании. М: Альпина Бизнес Букс, 2004. 239 с.
- [10] Маккей Х. Как уцелеть среди акул: (Опередить конкурентов в умении продавать, руководить, стимулировать, заключать сделки) / под ред. И.В. Липсица. М.: Экономика, 1992. 172 с.
- [11] Лурье С. Вторая волна // СНИР, 2004. № 3. С. 102–104.
- [12] Надежность и эффективность в технике: справочник: В 10 т. М.: Машиностроение. Т. 3: Эффективность технических систем / под ред. В.Ф. Уткина, Ю.В. Крючкова. М.: Машиностроение, 1988. 328 с.
- [13] «Менять придется чуть более чем все!»: Алексей Чадаев о причинах технологического лидерства Запада. URL: <https://www.business-gazeta.ru/article/567396>, 2022 (дата обращения 23.03.2023).
- [14] Порошков В.В. Создание ПИК для РКК «Энергия — Буран» // Измерительный комплекс космодрома Байконур: сб. материалов, документов, воспоминаний ветеранов измерительного комплекса космодрома Байконур / под ред. К.Х. Осканяна. Байконур: Изд-во Войсковой части 68526, 1999. С. 124–181.
- [15] Сковорода-Лузин В.И. Телеметрия. Глаза и уши главного конструктора. М.: Изд-во ООО «Оверлей», 2009. 320с.
- [16] Победоносцев В.А. Очерки истории развития отечественной ракетной радиотелеметрии (1946–2006 гг.) и место системы БРС-4 в этой истории. М.: Троянт, 2007. 160 с.
- [17] Чуев Ю.В., Михайлов Ю.Б., Кузьмин В.И. Прогнозирование количественных характеристик процессов. М.: Сов. радио, 1975. 400 с.
- [18] Глушков В.М. Основы безбумажной информатики. М.: Наука, 1987. 552 с.
- [19] Назаров А.В., Козырев Г.И., Шитов И.В. Современная телеметрия в теории и на практике. СПб.: Наука и техника, 2007. 672 с.
- [20] Рубцов В.А., Закидкин М.Н., Андрейко А.Н. Аппаратные средства комплекса «Родник» передачи телеметрической информации по широкополосным каналам связи // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2001. № 10. С. 35–37.
- [21] Модуль цифрового ввода М2081. Техническое описание БЛИЖ.404250.004-01 ТО, 2001 г.
- [22] Модуль М2181Е1. Техническое описание БЛИЖ.404210.002-01 ТО, 2001 г.
- [23] Богомолов О.С., Степкин В.С. Автоматизированная обработка телеметрической информации. М.: МО СССР, 1977. 166 с.
- [24] Справочник по телеметрии / под ред. Э. Грюнберга. М.: Машиностроение, 1979. 484 с.
- [25] Бассвиль М., Вилски А., Банвенист А. Обнаружение изменения свойств сигналов и динамических систем / под ред. М. Бассвиль, А. Банвениста. М.: Мир, 1989. 278 с.
- [26] Каргин В.А., Скороходов Я.А., Николаев Д.А., Шовкалюк А.П. Алгоритмы оценивания вероятностных характеристик информационных процессов по статистикам превышений уровней // Труды МАИ, 2015. Вып. 84. С. 1–21.
- [27] Андреев А.М., Дяченко С.И., Махров К.Б., Федоренко М.Ю. Экспериментальное исследование метода обнаружения существенных изменений в телеметрируемых параметрах // Тезисы доклада в материалах отраслевой науч.-техн. конф. приборостроительных организаций Роскосмоса «Информационно-управляющие и измерительные системы–2012», г. Королев, Моск. обл., 20–21 сентября 2012 г. Королев: ОАО «НПО ИТ», 2012. С. 11–13.
- [28] Медейрос Д. ContrastPCI на волне Мура // Мир компьютерной автоматизации, 1999. № 2. С. 46–48.

Сведения об авторе

Воронцов Валерий Леонидович — канд. техн. наук, ведущий специалист АО «Российские космические системы», a762642@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.09.2023.

Одобрено после рецензирования 06.10.2023.

Принята к публикации 24.10.2023.

DEVELOPMENT MANAGEMENT OF INFORMATION AND TELEMETRY SUPPORT SYSTEMS FOR LAUNCH VEHICLE UNDER DISRUPTIVE TECHNOLOGIES

V.L. Vorontsov

Joint-stock company «Russian Space Systems», 53, Aviamotornaya st., 111250, Moscow, Russia

a762642@yandex.ru

The research results concerning the development of information-telemetry support systems for launch vehicle are presented. The domestic systems of information-telemetric support for launch vehicle development under the influence of disruptive technologies is considered. It is shown that it is necessary to take organizational and technical measures to significantly improve the management of the domestic systems of information-telemetry support for launch vehicles, related to the creation, support and regulation tools (first of all, the official concept of information-telemetry support systems for launch vehicle development and the corresponding system of telemetry standards) and conditions for their effective application.

Keywords: general (generalized) indicators, disruptive technologies, software and hardware facilities, information and telemetry support system for launch vehicle development, telemetered object, telemetry information

Suggested citation: Vorontsov V.L. *Upravlenie razvitiem sistem informatsionno-telemetricheskogo obespecheniya otrabotki sredstv vyvedeniya v usloviyakh vliyaniya podryvnykh tekhnologiy* [Development management of information and telemetry support systems for launch vehicle under disruptive technologies]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 6, pp. 160–177. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-160-177

References

- [1] Vorontsov V.L. *Sistema informatsionno-telemetricheskogo obespecheniya otrabotki sredstv vyvedeniya. Strategii usovershenstvovaniya i primeneniya* [System of information and telemetry support for testing launch vehicles. Strategies for improvement and application]. Moscow: Hotline — Telecom, 2021, 236 p.
- [2] Vorontsov V.L., Davydov I.A. *Reglamentirovanie protsessa razvitiya sistem informatsionno-telemetricheskogo obespecheniya otrabotki sredstv vyvedeniya* [Regulation of the process of development of systems for information and telemetry support for testing launch vehicles]. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy* [Rocket and space instrument engineering and information systems], 2021, v. 8, iss. 2, pp. 43–50.
- [3] Vorontsov V.L., Davydov I.A., Medvedev E.V. *Podkhody k reglamentirovaniyu protsessa razvitiya sredstv informatsionno-telemetricheskogo obespecheniya otrabotki ob'ektov raketno-kosmicheskoy tekhniki* [Approaches to regulating the process of development of means of information and telemetry support for testing objects of rocket and space technology]. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy* [Rocket and space instrument engineering and information systems], 2022, v. 9, iss. 1, pp. 42–54.
- [4] Vorontsov V.L., Davydov I.A. *Reglamentirovanie protsessa razvitiya sistem informatsionno-telemetricheskogo obespecheniya otrabotki sredstv vyvedeniya na vseh etapakh ikh zhiznennogo tsikla* [Regulating the process of development of systems for information and telemetry support for testing launch vehicles at all stages of their life cycle]. *Sovremennye problemy sozdaniya i ekspluatatsii vooruzheniya, voennoy i spetsial'noy tekhniki: mater. V Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern problems of creation and operation of weapons, military and special equipment: material. V All-Russian Scientific and Practical Conference], St. Petersburg, December 09–10, 2021. St. Petersburg: Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, 2022, pp. 77–84.
- [5] Vorontsov V.L., Davydov I.A. *Kontseptual'nye napravleniya realizatsii printsipa «nauka — praktike» v razvitiy otechestvennykh sistem informatsionno-telemetricheskogo obespecheniya otrabotki sredstv vyvedeniya* [Conceptual directions for implementing the «science-to-practice» principle in the development of domestic systems for information and telemetry support for testing launch vehicles]. *Informatsionno-upravlyayushchie i izmeritel'nye sistemy — 2023: mater. otraslevoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii priborostroitel'nykh organizatsiy Goskorporatsii «Roskosmos», posvyashchennoy 60-letiyu poleta pervoy zhenshchiny-kosmonavta V.V. Tereshkovoy* [Information, control and measuring systems — 2023: material. industry scientific and technical conference of instrument-making organizations of the Roscosmos State Corporation, dedicated to the 60th anniversary of the flight of the first female cosmonaut V.V. Tereshkova], Moscow, April 20, 2023. Moscow: Roscosmos, 2023, pp. 9–17.
- [6] Vorontsov V.L., Davydov I.D. *Kontseptsiya razvitiya sistem informatsionno-telemetricheskogo obespecheniya otrabotki sredstv vyvedeniya* [Concept for the development of systems for information and telemetry support for testing launch vehicles]. *Radioelektronnaya otrasl': problemy i ikh resheniya* [Radioelectronic industry: problems and their solutions], 2023.
- [7] *Nadezhnost' i effektivnost' v tekhnike* [Reliability and efficiency in technology: Directory]. In 10 vol. Moscow: Mechanical Engineering. T.I: Methodology. Organization. Terminology. Ed. A.I. Rembez. Moscow: Mechanical Engineering, 1986, 224 p.
- [8] GOST 19619–74 *Oborudovanie radiotelemetricheskoe. Terminy i opredeleniya* [Radio telemetry equipment. Terms and Definitions]. Moscow: Standartinform, 2005, 20 p.
- [9] Christensen K.M. *Dilemma innovatora. Kak iz-za novykh tekhnologiy pogibayut sil'nye kompanii* [The innovator's dilemma. How strong companies perish due to new technologies]. Moscow: Alpina Business Books, 2004, 239 p.
- [10] McKay H. *Kak utselet' sredi akul: (Operedit' konkurentov v umenii prodavat', rukovodit', stimulirovat', zaklyuchat' sdelki)* [How to survive among the sharks: (Be ahead of competitors in the ability to sell, manage, stimulate, make deals)]. Ed. I.V. Lipsitsa. Moscow: Economics, 1992, 172 p.

- [11] Lur'e S. *Vtoraya volna* [Second wave. CHIP], 2004, no. 3, pp. 102–104.
- [12] *Nadezhnost' i effektivnost' v tekhnike* [Reliability and efficiency in technology: Directory]: In 10 volumes. Moscow: Mechanical Engineering, T. 3: Efficiency of technical systems. Ed. V.F. Utkina, Yu.V. Kryuchkova. Moscow: Mechanical Engineering, 1988, 328 p.
- [13] «Menyat' pridetsya chut' bolee chem vse!»: Aleksey Chadaev o prichinakh tekhnologicheskogo liderstva Zapada [Alexey Chadayev on the reasons for the technological leadership of the West]. Available at: <https://www.business-gazeta.ru/article/567396>, 2022 accessed 23.03.2023).
- [14] Poroshkov V.V. Sozdanie PIK dlya RKK «Energiya — Buran» [Creation of PIK for RSC Energia — Buran]. Izmeritel'nyy kompleks kosmodroma Baykonur: sb. materialov, dokumentov, vospominaniy veteranov izmeritel'nogo kompleksa kosmodroma Baykonur [Measuring complex of the Baikonur cosmodrome: collection. materials, documents, memories of veterans of the measuring complex of the Baikonur cosmodrome]. Ed. K.H. Oskanyan. Baikonur: Military unit 68526, 1999, pp. 124–181.
- [15] Skovoroda-Luzin V.I. *Telemetriya. Glaza i ushi glavnogo konstruktora* [Telemetry. The eyes and ears of the Chief Designer]. Moscow: Overley LLC, 2009, 320 p.
- [16] Pobedonostsev V.A. *Ocherki istorii razvitiya otechestvennoy raketnoy radiotelemetrii (1946–2006 gg.) i mesto sistemy BRS-4 v etoy istorii* [Essays on the history of the development of domestic rocket radio telemetry (1946–2006) and the place of the BRS-4 system in this history]. Moscow: Trovant, 2007, 160 p.
- [17] Chuev Yu.V., Mikhaylov Yu.B., Kuz'min V.I. *Prognozirovanie kolichestvennykh kharakteristik protsessov* [Forecasting quantitative characteristics of processes]. Moscow: Sov. radio, 1975, 400 p.
- [18] Glushkov V.M. *Osnovy bezbumazhnoy informatiki* [Fundamentals of paperless computer science]. Moscow: Nauka, 1987, 552 p.
- [19] Nazarov A.V., Kozyrev G.I., Shitov I.V. *Sovremennaya telemetriya v teorii i na praktike* [Modern telemetry in theory and practice]. St. Petersburg: Science and technology, 2007, 672 p.
- [20] Rubtsov V.A., Zakidkin M.N., Andreyko A.N. *Apparatnye sredstva kompleksa «Rodnik» peredachi telemetricheskoy informatsii po shirokopolosnym kanalam svyazi* [Hardware of the Rodnik complex for transmitting telemetric information via broadband communication channels]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Devices and systems. Management, control, diagnostics], 2001, no. 10, pp. 35–37.
- [21] *Modul' tsifrovogo vvida M2081. Tekhnicheskoe opisanie BLIZh.404250.004-01 TO, 2001 g.* [Digital input module M2081. Technical description BLIZH.404250.004-01 TO, 2001].
- [22] *Modul' M2181E1. Tekhnicheskoe opisanie BLIZh.404210.002-01 TO, 2001 g.* [Module M2181E1. Technical description BLIZH.404210.002-01 TO, 2001].
- [23] Bogomolov O.S., Stepkin V.S. *Avtomatizirovannaya obrabotka telemetricheskoy informatsii* [Automated processing of telemetric information]. Moscow: USSR Ministry of Defense, 1977, 166 p.
- [24] *Spravochnik po telemetrii* [Handbook of telemetry]. Ed. E. Grunberg. Moscow: Mechanical Engineering, 1979, 484 p.
- [25] Bassvil' M., Vilski A., Banvenist A. *Obnaruzhenie izmeneniya svoystv signalov i dinamicheskikh sistem* [Detection of changes in the properties of signals and dynamic systems]. Ed. M. Basseville, A. Banvenista. Moscow: Mir, 1989, 278 p.
- [26] Kargin V.A., Skorokhodov Ya.A., Nikolaev D.A., Shovkalyuk A.P. *Algoritmy otsenivaniya veroyatnostnykh kharakteristik informatsionnykh protsessov po statistikam prevysheniy urovney* [Algorithms for assessing the probabilistic characteristics of information processes based on statistics of level excesses]. *Trudy MAI* [Proceedings of MAI], 2015, v. 84, pp. 1–21.
- [27] Andreev A.M., Dyachenko S.I., Makhrov K.B., Fedorenko M.Yu. *Eksperimental'noe issledovanie metoda obnaruzheniya sushchestvennykh izmeneniy v telemetrirovemykh parametrah* [Experimental study of a method for detecting significant changes in telemetered parameters]. *Tezisy doklada v materialakh otraslevoy NTK priborostroitel'nykh organizatsiy Roskosmosa «Informatsionno-upravlyayushchie i izmeritel'nye sistemy — 2012»* [Abstracts of the report in the materials of the industry scientific and technical complex of instrument-making organizations of Roscosmos «Information-control and measuring systems — 2012»], g. Korolev, Mosk. obl., 20–21 sentyabrya 2012 g. Korolev: OAO «NPO IT», 2012, pp. 11–13.
- [28] Medeyros D. *CompactPCI na volne Mura* [CompactPCI on Moore's wave]. *Mir komp'yuternoy avtomatizatsii* [World of Computer Automation], 1999, no. 2, pp. 46–48.

Author's information

Vorontsov Valeriy Leonidovich — Cand. Sci. (Tech.), Leading specialist, of the Joint-stock company «Russian Space Systems», a762642@yandex.ru

Received 22.09.2023.

Approved after review 06.10.2023.

Accepted for publication 24.10.2023.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СОСТОЯНИЙ ИЗУЧАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ И ПРОЦЕССОВ ИЗМЕРЕНИЙ АНАЛИЗИРУЕМЫХ ФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Е.А. Тесленко[✉], М.Ю. Екимова

Научно-испытательный центр 4-го Государственного центрального межвидового полигона Министерства обороны Российской Федерации (полигон Капустин Яр) (4 ГЦМП МО РФ), Россия, 416550, Астраханская обл., г. Знаменск, ул. Королева, д. 1

teslenko.zhenka@yandex.ru

Рассмотрен вопрос, возникающий в процессе анализа физических систем. Приведено математическое описание состояний изучаемых объектов и процессов измерений их выходных параметров в процессе функционирования, заключающееся в установлении соответствующих математических моделей состояний, оценивании состояний и параметрической идентификации динамических систем на выбранных математических моделях по результатам измерений, получаемых в процессе испытаний и экспериментов. Установлены формы математических моделей состояний, математических моделей процессов измерений для идентификации параметров и оценивание состояний динамических систем, и сводится к определению состояний и неизвестных параметров заданных моделей. Определены оценки неизвестных параметров путем установления оптимального соответствия выбранной формы математической модели, составляющей глубину ее формализации, и параметров этой модели имеющимся априорным данным и результатам измерений. Приведено доказательство сформулированного утверждения для случая нелинейной модели состояний. Разработана математическая модель состояний динамической системы и модель измерений, представлена связь уравнений состояний и измерений в наиболее общем случае, заданная в виде аддитивной смеси полезного сигнала, описываемого нелинейным уравнением измерений и случайной помехи. Представлены исследования свойств моделей состояний и измерений с применением гауссовской и марковской аппроксимации. Рассмотрено последующее использование получаемых оценок состояний параметров динамических систем на моделях, являющихся адекватными реальным системам и процессам измерений и приведение их к условиям статистической однородности.

Ключевые слова: идентификация, параметры, динамическая система, математическая модель

Ссылка для цитирования: Тесленко Е.А., Екимова М.Ю. Математическое описание состояний изучаемых объектов и процессов измерений анализируемых физических систем // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 6. С. 178–188. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-178-188

Математическое описание состояний изучаемых объектов и процессов измерений их выходных параметров в процессе функционирования является одним из важнейших вопросов, возникающих в процессе анализа физических систем. Такое изучение заключается в установлении соответствующих математических моделей состояний, оценивании состояний и параметрической идентификации динамических систем на выбранных математических моделях по результатам измерений, получаемых в процессе испытаний и экспериментов.

Идентификация параметров и оценивание состояний динамических систем обычно предполагает, что выбраны определенные формы математических моделей состояний, математических моделей процессов измерений, и сводится к определению состояний и неизвестных параметров заданных моделей. Оценки неизвестных параметров определяются путем установления оптимального соответствия выбранной формы математической модели, определяющей глубину

ее формализации, и параметров такой модели имеющимся априорным данным и результатам измерений. При этом всякий раз приходится учитывать то, что для выбранной математической модели можно определить оптимальные оценки параметров, однако это не является гарантией их пригодности в случаях, когда модель неверна.

Традиционно формализация моделей состояний динамических систем и процессов измерений их выходных параметров, которые бы в наибольшей степени позволяли учитывать возможные возмущающие факторы, предпринималась при углублении степени формализации используемых математических моделей за счет расширения их вектора параметров. Это в ряде случаев привело к противоположному эффекту, когда была утрачена практическая возможность решения задач параметрической идентификации динамических систем и оценивания их состояний. Основные причины такого противоречия связаны прежде всего с нарушением фундаментальных свойств наблюдаемости [1] используемых моделей при увеличении размерности вектора оцениваемых параметров.

Цель работы

Цель работы — описание математическими методами состояния изучаемых объектов и процессов измерений, а также сопутствующих выходных параметров в процессе функционирования различных физических систем.

Материалы и методы

Разработка математических моделей состояний и измерений. Разработка математической модели состояний динамической системы. Известны попытки использования в задачах параметрической идентификации реальных физических систем, являющихся, по существу, системами бесконечной размерности, упрощенных моделей состояний и измерений, т. е. таких, которые заведомо содержат погрешности формализации [2–5] и описывают лишь некоторую проекцию состояний реальных динамических систем или систем измерений. Однако известны возражения, не позволяющие в достаточной степени обосновать широкое практическое применение имеющихся теоретических разработок в области задач оценивания состояний и идентификации параметров моделей состояний реальных динамических систем и средств измерений. Такие возражения затрагивают в основном принимаемые допущения о параметрах законов распределения действующих возмущений в уравнениях состояний [2, 5, 6], случайных помех в уравнениях измерений, а также процедуры поиска оптимальных оценок параметров и состояний [4, 5].

В целях решения задач оценивания состояний и параметрической идентификации динамических систем необходимо прежде всего решить принципиальный вопрос о возможности адекватного описания реальных динамических систем математическими моделями конечной размерности. Здесь условие адекватного описания [7, 8] рассматривается в отношении интересующего вектора параметров и состояний ограниченной размерности. В связи с этим целесообразно рассмотреть следующее.

Всякая динамическая система, представленная в пространстве состояний бесконечной размерности, может быть адекватно описана относительно вектора фазовых координат конечной размерности математической моделью состояний, содержащей векторную марковскую составляющую формирующего шума.

Доказательство сформулированного утверждения приведено ниже для случая нелинейной модели состояний.

Пусть реальная нелинейная динамическая система описывается с точностью до векторного формирующего шума $\omega(t)$, имеющего нулевое

среднее $E\{\omega(t)\} = 0$ и коррелированную матрицу интенсивностей — δ

$$\text{cov}\{\omega(t) \cdot \omega^T(t-\tau)\} = Q_\omega \cdot \delta(t-\tau)$$

математической моделью вида

$$\dot{x}(t) = f[x(t), t] + g[x(t), t] \cdot \omega(t), \quad (1)$$

где $f[\cdot]$ — векторная функция;

$x(t)$ — вектор фазовых координат в фазовом пространстве Ω_x^∞ бесконечной размерности;

$g[\cdot]$ — матрица интенсивностей формирующего шума.

Представив уравнение (1) в виде

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1[x(t), t] \\ f_2[x(t), t] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1[x(t), t] \\ g_2[x(t), t] \end{bmatrix} \cdot \omega(t),$$

можно выделить ту часть уравнений состояний, которая является моделью конечной размерности и адекватно описывает вектор параметров и состояний $x_1(t) \in \Omega_x^n$:

$$\dot{x}_1(t) = f_1[x(t), t] + g_1[x(t), t] \cdot \omega(t).$$

Поскольку векторная функция $f_1[x(t), t]$ включает в себя полный вектор параметров и состояний $x(t) \in \Omega_x^\infty$, то может быть преобразована к виду

$$f_1[x(t), t] = f_1[x_1(t), x_2(t), t], \quad (2)$$

Разложение этой функции в ряд Маклорена [9, 10] относительно вектора имеет вид

$$f_1[x(t), t] = f_1[x_1(t), 0, t] + \frac{\partial}{\partial x_2} f_1[x_1(t), 0, t] \cdot x_2(t) + \frac{1}{2!} \cdot x_2^T(t) \cdot \frac{\partial}{\partial x_2} \left[\frac{\partial}{\partial x_2} f_1[x_1(t), 0, t] \right]^T \cdot x_2(t) + \dots$$

Для суммы членов разложения начиная со второго можно записать

$$b[x_1(t), t] \cdot u(t) \triangleq E \left\{ \frac{\partial}{\partial x_2} f_1[x_1(t), 0, t] \cdot x_2(t) + \frac{1}{2!} \cdot x_2^T(t) \cdot \frac{\partial}{\partial x_2} \left[\frac{\partial}{\partial x_2} f_1[x_1(t), 0, t] \right]^T \cdot x_2(t) + \dots \right\}, \quad (3)$$

что позволяет выделить высокочастотную составляющую $g^*[x_1(t), t] \cdot \omega(t)$ формирующего шума:

$$g^*[x_1(t), t] \cdot \omega(t) \triangleq \frac{\partial}{\partial x_2} f_1[x_1(t), 0, t] \cdot x_2(t) + \frac{1}{2!} \cdot x_2^T(t) \cdot \frac{\partial}{\partial x_2} \left[\frac{\partial}{\partial x_2} f_1[x_1(t), 0, t] \right]^T \cdot x_2(t) + \dots - b[x_1(t), t] \cdot u(t), \quad (4)$$

для которой первый статистический момент имеет вид $E\{g^*[x_1(t), t] \cdot \omega(t)\} = 0$, а векторная составляющая $u(t)$ является медленно изменяющимся марковским формирующим шумом.

С учетом соотношения (3) и выражения (4) модель (2) можно представить в виде

$$\dot{x}_1(t) = f[x_1(t), 0, t] + b[x_1(t), t] \cdot u(t) + g^*[x_1(t), t] \cdot \omega(t),$$

где функция $f[x_1(t), 0, t]$ не зависит от вектора $x_2(t)$ и поэтому справедливо следующее равенство:

$$f[x_1(t), 0, t] = f[x_1(t), t].$$

С учетом этого равенства уравнение модели состояний нелинейной динамической системы, адекватной реальной нелинейной динамической системе на векторе параметров и состояний конечной размерности $x_1(t) \subset x(t)$, можно представить в виде

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= f[x_1(t), t] + b[x_1(t), t] \cdot u(t) + \\ &+ g^*[x_1(t), t] \cdot \omega(t) + g_1[x_1(t), t] \cdot \omega(t) = \end{aligned} \quad (5)$$

$$= f[x_1(t), t] + b[x_1(t), t] \cdot u(t) + \tilde{g}[x_1(t), t] \cdot \omega(t),$$

что доказывает справедливость этого утверждения для нелинейных динамических систем.

Уравнение (5) для описания вектора $x_1(t) \in \Omega_x^n$ фазовых координат $x_1(t) \subset x(t)$ нелинейной динамической системы можно отождествить с динамической системой конечной размерности

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f[x(t), t] + b[x(t), t] \cdot u(t) + \\ &+ g[x_1(t), t] \cdot \omega(t), \end{aligned} \quad (6)$$

полагая, что вектор параметров и состояний $x(t)$ математической модели эквивалентен вектору $x_1(t)$ фазовых координат реальной динамической системы, а вектор $u(t)$ является медленно изменяющейся марковской составляющей с априорно неизвестными параметрами распределения.

Описание изучаемых объектов и процессов их функционирования математическими моделями с последующим решением задач оценивания состояний и идентификации параметров таких моделей по результатам измерений, получаемых в процессе испытаний и экспериментов, основывается на том, что оценки неизвестных параметров определяются путем установления оптимального соответствия выбранной формы математической модели, определяющей глубину ее формализации, и параметров такой модели имеющимся априорными данными и результатам измерений.

Понятие оптимальности предполагает, что установлены свойства действующих в процессе функционирования динамической системы случайных возмущений, а также случайной помехи в результатах измерений ее выходных параметров, что приводит к необходимости исследовать свойства указанных случайных факторов.

Разработка математических моделей измерений

Нелинейная модель изменений. Связь уравнений состояний и измерений в наиболее общем случае может быть задана в виде аддитивной смеси полезного сигнала, описываемого нелинейным уравнением измерений, и случайной помехи

$$y(t) = h[x(t), t] + v(t), \quad (7)$$

где $h[\cdot]$ — векторная функция измерений;

$v(t)$ — δ -коррелированная нормально распределенная случайная векторная помеха с нулевым средним $E\{v(t)\} = 0$ и матрицей ковариаций $\text{cov}\{v(t) \cdot v^T(t - \tau)\} = Q_v \cdot \delta(t - \tau)$.

Дальнейшие преобразования уравнения (7) связаны с представлением уравнения нелинейных измерений на уровне рассматриваемых конечномерных математических моделей состояний динамических систем, когда

$$y(t) = h[x_1(t), x_2(t), t] + v(t), \quad (8)$$

где $x_1(t)$ и $x_2(t)$ имеют тот же смысл, что и в уравнении (5).

Разложение векторной функции $h[\cdot]$ в ряд Маклорена относительно вектора $\{x_1(t), 0\}$ позволяет получить выражение

$$\begin{aligned} y(t) &= h[x_1(t), 0, t] + \frac{\partial}{\partial x_2} h[x_1(t), 0, t] \cdot x_2(t) + \\ &+ \frac{1}{2!} \cdot x_2^T(t) \cdot \frac{\partial}{\partial x_2} \left[\frac{\partial}{\partial x_2} h[x_1(t), 0, t] \right]^T \cdot x_2(t) + \dots + v(t). \end{aligned} \quad (9)$$

Для суммы членов разложения ряда Маклорена, начиная со второго, можно записать

$$\begin{aligned} \xi(t) &= E \left\{ \frac{\partial}{\partial x_2} h[x_1(t), 0, t] \cdot x_2(t) + \frac{1}{2!} \times \right. \\ &\left. \times x_2^T(t) \cdot \frac{\partial}{\partial x_2} \left[\frac{\partial}{\partial x_2} h[x_1(t), 0, t] \right]^T \cdot x_2(t) + \dots \right\}, \end{aligned} \quad (10)$$

что позволяет выделить высокочастотную зашумляющую составляющую

$$\begin{aligned} v^*(t) &= \frac{\partial}{\partial x_2} h[x_1(t), 0, t] \cdot x_2(t) + \\ &+ \frac{1}{2!} \cdot x_2^T(t) \cdot \frac{\partial}{\partial x_2} \left[\frac{\partial}{\partial x_2} h[x_1(t), 0, t] \right]^T \times \\ &\times x_2(t) + \dots + v(t) - \xi(t), \end{aligned} \quad (11)$$

для которой первый статистический момент $E\{v^*(t)\} = 0$, а векторная переменная $\xi(t)$ является медленно меняющейся марковской составляющей случайной помехи в измерениях с априорно неизвестными параметрами распределения.

С учетом соотношений (10) и (11) уравнение (8) можно преобразовать к виду

$$y(t) = h[x_1(t), 0, t] + \xi(t) + v^*(t) + v(t) = h[x_1(t), 0, t] + \xi(t) + \tilde{v}(t). \quad (12)$$

Поскольку функция $h[x_1(t), 0, t]$ не зависит от вектора $x_2(t)$, то справедливо следующее равенство $h[x_1(t), 0, t] = h[x_1(t), t]$.

Нелинейную модель измерений, адекватную реальному процессу измерений на векторе параметров и состояний конечной размерности $x_1(t) \subset x(t)$, можно записать в виде

$$y(t) = h[x_1(t), t] + \xi(t) + \tilde{v}(t), \quad (13)$$

что доказывает справедливость утверждения для нелинейных моделей измерений выходных параметров бесконечномерных динамических систем.

Исследование свойств моделей состояний и измерений. Применимость гауссовской и марковской аппроксимации. Рассмотрим ситуацию, когда поведение динамических систем описывается с помощью переменных состояния (фазовых координат) дифференциальных уравнений первого порядка относительно этих переменных. Учитывая, что реальная динамическая система функционирует под воздействием случайных возмущений (и управляющих воздействий), помех и шумов, состояние системы в любой момент времени является случайным, т. е.

$$\dot{x}(t) = f[x(t), t] + g[x(t), t] \times \omega(t), \quad x(t_0) = x_0, \quad (14)$$

где $f[\cdot], g[\cdot]$ — детерминированные функции своих аргументов; $\omega(t)$ — входной центрированный случайный процесс с конечным временем корреляции.

Принятый в модели (14) динамической системы формирующий шум является, по своей сути, белым гауссовским случайным процессом, характерным для описания шумов электронных устройств, тепловых флуктуаций, космического излучения и т. п. [11]. Такие случайные процессы представляют собой суммарный эффект большого числа относительно малых импульсов, возникающих в случайные моменты времени. На основании центральной предельной теоремы [10, 12] плотность распределения вероятностей этой суммы неограниченно приближается к гауссовской с увеличением числа слагаемых независимо от того, какие плотности вероятностей имеют отдельные слагаемые. Ссылка на то, что гауссовский шум является белым, относится к интервалу автокорреляции, который принимается намного меньшим всех характерных постоянных времени рассматриваемой динамической системы [43], т. е. для белого шума функция автокорреляции определяется следующей зависимостью

$$R(\tau) = \begin{cases} 1, & \tau = 0; \\ 0, & \tau \neq 0. \end{cases}$$

Важнейшим свойством гауссовских распределений является то, что они сохраняют неизменность вида распределения при линейных преобразованиях [14]. В связи с этим переход от бесконечномерных моделей состояния $x(t) \in \Omega_x^\infty$ реальных динамических стохастических систем (14) к их конечномерному представлению $x_1(t) \in \Omega_x^n$ согласно изложенному выше для линейных систем в виде

$$\dot{x}_1(t) = -\alpha_{11}(t) \cdot x_1(t) - \alpha_{12}(t) \cdot x_2(t) + g[x_1(t), t] \cdot \omega(t),$$

где

$$b[x_1(t), t] \cdot u(t) = M\{-\alpha_{12}(t) \cdot x_2(t)\}, \quad (15)$$

$$g^*[x_1(t), t] \cdot \omega(t) = -\alpha_{12}(t) \cdot x_2(t) - b[x_1(t), t] \cdot u(t) = -\alpha_{12}(t) \cdot x_2(t) - M\{-\alpha_{12}(t) \cdot x_2(t)\}, \quad (16)$$

или для модели состояний нелинейных систем в виде

$$\dot{x}_1(t) = f[x_1(t), 0, t] + b[x_1(t), t] \cdot u(t) + g^*[x_1(t), t] \cdot \omega(t),$$

где

$$b[x_1(t), t] \cdot u(t) = M\left\{\frac{\partial}{\partial x_2} f_1[x_1(t), 0, t] \cdot x_2(t) + \frac{1}{2!} \cdot x_2^T(t) \cdot \frac{\partial}{\partial x_2} \left[\frac{\partial}{\partial x_2} f_1[x_1(t), 0, t] \right]^T \cdot x_2(t) + \dots\right\}; \quad (17)$$

$$g^*[x_1(t), t] \cdot \omega(t) = \frac{\partial}{\partial x_2} f_1[x_1(t), 0, t] \cdot x_2(t) + \frac{1}{2!} \cdot x_2^T(t) \cdot \frac{\partial}{\partial x_2} \left[\frac{\partial}{\partial x_2} f_1[x_1(t), 0, t] \right]^T \cdot x_2(t) + \dots - b[x_1(t), t] \cdot u(t), \quad (18)$$

не меняет вида закона распределения случайных процессов $\omega(t)$ и $u(t)$ в уравнениях состояний, поскольку в соотношениях (15)–(18) использованы операции линейных преобразований.

В уравнениях (15)–(18) принято: $x_1(t)$ — вектор параметров и состояний, подлежащих изучению, для которого справедливо $x_1(t) \subset x(t)$ и $Dim\{x_1(t)\} < Dim\{x(t)\}$, а также $x_2(t) = x(t) / x_1(t), x_2(t) \subset x(t)$.

Переход к дискретным последовательностям, определяемым разностным уравнением вида

$$x(k+1) = x(k) + f[x(k), w(k), k] \cdot \tau,$$

где $f[\cdot]$ — заданная непрерывная функция;

$w(k)$ — случайная (не белая) входная последовательность, позволяет отнести рассматриваемые модели и их отдельные составляющие сноса и диффузии [15, 16] к марковским, поскольку распределение вероятностей каждого члена такой последовательности зависит только от значения предыдущего члена, т. е.

$$\begin{aligned} \varphi[x(k+1)/x(k), x(k-1), \dots, x(0)] = \\ = \varphi[x(k+1)/x(k)]. \end{aligned}$$

Марковские модели процессов нашли широкое применение при анализе и синтезе систем управления и связи, статистической обработке результатов измерений [1, 15–20], что обусловлено несомненным их достоинством — возможностью построения рекуррентных расчетных правил, существенно упрощающих алгоритмическую реализацию как математических моделей анализируемых систем, так и синтезируемых оптимальных фильтров.

С учетом марковости рассматриваемых моделей и последовательностей уравнение (1) можно представить в эквивалентной дискретной форме

$$\begin{aligned} x(k) = F(k/k-1) \cdot x(k-1) + \\ + G(k/k-1) \cdot w(k-1), \end{aligned} \quad (19)$$

где $F(\cdot)$, $G(\cdot)$ — переходные матрицы состояний и возмущений;

$w(\cdot)$ — входная винеровская последовательность.

Винеровский процесс по определению находится через белый шум $\omega(t)$ из стохастического дифференциального уравнения [21]

$$\frac{dw(t)}{dt} = \omega(t), \quad w(t_0) = w(0).$$

Поскольку белый шум $\omega(t)$ предполагается гауссовским процессом и при линейных преобразованиях свойство гауссовости сохраняется, то процесс $w(\cdot)$ также будет гауссовским с математическим ожиданием

$$\mu_w = M\{w(t)\} = \int_0^t w(t) dt = 0$$

и дисперсией

$$\begin{aligned} D_w = \text{cov}\{w(t), w(t)\} = \\ = \int_0^{t_1} \int_0^{t_2} M\{w(t), w(t)\} dt_1 dt_2 \cdot N_w(t) \cdot t, \end{aligned}$$

где $N_w(\cdot)$ — матрица интенсивностей или матрица спектральных плотностей белого шума [11].

Кроме того, можно отметить, что винеровская последовательность также является марковской [22].

Таким образом, рассматриваемые конечные математические модели динамических стохастических систем в полной мере относятся к марковским (порождающим марковские последовательности), развитие которых происходит под воздействием гауссовских формирующих шумов [23–28].

Инвариантность моделей состояний и измерений к изменениям условий функционирования. Инвариантность математических моделей рассматривается с позиции неизменности их конечномерных формальных форм (систем дифференциальных уравнений), описание которых выполнено в соответствии с рассмотренными выше теоретическими положениями о достижимости адекватного описания в случаях, когда исследуется влияние комплекса факторов, определяющих условия функционирования изучаемых систем и процессов измерений их выходных параметров. Необходимость этого вызвана тем, что последующее использование получаемых оценок состояний параметров динамических систем на моделях, являющихся адекватными реальным системам и процессам измерений, предполагает приведение их к условиям статистической однородности. Это означает, что используемые оценки состояний и параметров должны быть получены на эквивалентных моделях, т. е. моделях, формы которых (состав и вид дифференциальных уравнений) инвариантны к реализовавшимся условиям функционирования (испытаний).

Изучение свойств инвариантности математических моделей следует рассматривать в отношении их форм, схожих с формами на основе уравнений диффузионного движения [1, 13, 15, 16, 28], содержащими уравнения сноса и диффузии. Рассматриваемые модели состояний, таким образом, имеют формы которые включают в себя:

– уравнения сноса (детерминированная составляющая);

– уравнения медленно меняющейся марковской составляющей изменения параметров динамической системы (не формализуемая стохастическая составляющая уравнений состояний, привлекаемая к описанию нестационарных координат детерминированной составляющей модели);

– уравнение формирующего шума (не формализуемая составляющая формирующего шума, лишенная медленно меняющейся марковской составляющей), т. е. моделей состояний, имеющих, по сути, двухкомпонентный формирующий входной шум.

В отношении рассматриваемых математических моделей состояний изучение свойств их инвариантности сводится, следовательно, к установлению неизменности их форм при воздействиях различных комплексов возмущающих факторов.

Рассмотрим нелинейную динамическую систему. Пусть реальная нелинейная динамическая система описывается с точностью до векторного формирующего шума $\omega(t)$, имеющего нулевое среднее $M\{\omega(t)\} = 0$ и δ — коррелированную матрицу интенсивностей

$$\text{cov}\{\omega(t) \cdot \omega^T(t - \tau)\} = Q_\omega(t) \cdot \delta(t - \tau)$$

математической моделью вида

$$\dot{x}(t) = f[x(t), t] + g[x(t), t] \cdot \omega(t), \quad (20)$$

где $f[\cdot]$ — векторная функция;

$x(t)$ — вектор фазовых координат в фазовом пространстве Ω_x^∞ бесконечной размерности.

Пусть система подвергается воздействию возмущающих факторов, определяющих условия проведения эксперимента

$$\dot{\eta}(t) = b(t) \cdot \eta(t) + g_\eta[\eta(t), t] \cdot \eta_\omega(t) \quad (21)$$

где $\eta(\cdot)$ — векторный формирующий шум.

Тогда уравнение (20) можно записать в виде суммы (20) и (21), т. е.

$$\dot{x}(t) = f[x(t), t] + b(t) \cdot \eta(t) + g_\eta[\eta(t), t] \cdot \eta_\omega(t) + g[x(t), t] \cdot \omega(t). \quad (22)$$

Представим уравнение (22) в виде

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1[x(t), t] \\ f_2[x(t), t] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1(t) \\ b_2(t) \end{bmatrix} \cdot \eta(t) + \begin{bmatrix} g_{1,\eta}[\eta, t] \\ g_{2,\eta}[\eta, t] \end{bmatrix} \cdot \eta_\omega(t) + \begin{bmatrix} g_1[x_1(t), t] \\ g_2[x_2(t), t] \end{bmatrix} \cdot \omega(t),$$

причем можно выделить ту часть уравнений состояний, которая является моделью конечной размерности и адекватно описывает вектор параметров и состояний $x_1(t) \in \Omega_x^\infty$:

$$\dot{x}_1(t) = f_1[x(t), t] + b_1(t) \cdot \eta(t) + g_{1,\eta}[\eta(t), t] \cdot \eta_\omega(t) + g_1[x_1(t), t] \cdot \omega(t).$$

Поскольку векторная функция $f_1[x(t), t]$ включает в себя полный вектор состояний $x(t)$, то может быть преобразована к виду

$$f_1[x(t), t] = f_1[x_1(t), x_2(t), t] \quad (23)$$

Разложение этой функции в ряд Маклорена относительно вектора $\{x_1(t), 0\}$ имеет вид

$$f_1[x(t), t] = f_1[x_1(t), 0, t] + \frac{\partial}{\partial x_2} f_1[x_1(t), 0, t] \cdot x_2(t) + \frac{1}{2!} \cdot x_2^T(t) \cdot \frac{\partial}{\partial x_2} \left[\frac{\partial}{\partial x_2} f_1[x_1(t), 0, t] \right]^T \cdot x_2(t) + \dots$$

С учетом суммы членов разложения ряда Маклорена начиная со второго можно записать

$$\begin{aligned} b[x_1(t), t] \cdot u(t) &= \\ &= M \left\{ \frac{\partial}{\partial x_2} f_1[x_1(t), 0, t] \cdot x_2(t) + \right. \\ &+ \frac{1}{2!} \cdot x_2^T(t) \cdot \frac{\partial}{\partial x_2} \left[\frac{\partial}{\partial x_2} f_1[x_1(t), 0, t] \right]^T \cdot x_2(t) + \dots \\ &\left. \dots + b_1(t) \cdot \eta(t) + g_{1,\eta}[\eta(t), t] \cdot \eta_\omega(t) \right\}, \end{aligned} \quad (24)$$

что позволяет выделить высокочастотную составляющую формирующего шума

$$\begin{aligned} g^*[x_1(t), t] \cdot \omega(t) &= \\ &= \frac{\partial}{\partial x_2} f_1[x_1(t), 0, t] \cdot x_2(t) + \\ &+ \frac{1}{2!} \cdot x_2^T(t) \cdot \frac{\partial}{\partial x_2} \left[\frac{\partial}{\partial x_2} f_1[x_1(t), 0, t] \right]^T \cdot x_2(t) + \dots \quad (25) \\ &\dots + b_1(t) \cdot \eta(t) + g_{1,\eta}[\eta(t), t] \cdot \eta_\omega(t) - \\ &- b[x_1(t), t] \cdot u(t), \end{aligned}$$

для которого первый статистический момент $M\{g^*[x_1(t), t] \cdot \omega(t)\} = 0$.

С учетом соотношения (24) и выражения (25) модель (20) можно представить в виде

$$\dot{x}_1(t) = f_1[x_1(t), 0, t] + b[x_1(t), t] \cdot u(t) + g^*[x_1(t), t] \cdot \omega(t),$$

где $f_1[x_1(t), 0, t]$ не зависит от вектора параметров и состояний $x_2(t)$ и поэтому справедливо следующее равенство

$$f_1[x_1(t), 0, t] = f_1[x_1(t), t].$$

Тогда можно записать уравнение конечномерной модели состояний нелинейной динамической системы, адекватной реальной нелинейной динамической системе на векторе параметров и состояний конечной размерности $x_1(t) \subset x(t)$:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= f_1[x_1(t), 0, t] + b[x_1(t), t] \cdot u(t) + \\ &+ g^*[x_1(t), t] \cdot \omega(t) + g_1[x_1(t), t] = \\ &= f_1[x_1(t), 0, t] + b[x_1(t), t] \cdot u(t) + \\ &+ \tilde{g}[x_1(t), t] \cdot \omega(t). \end{aligned} \quad (26)$$

Уравнение (26) для описания вектора $x_1(t) \in \Omega_x^n$ фазовых координат $x_1(t) \subset x(t)$ нелинейной динамической системы можно отождествить с динамической системой конечной размерности

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f[x(t), 0, t] + b[x(t), t] \times \\ &\times u(t) + g[x(t), t] \cdot \omega(t), \end{aligned} \quad (27)$$

полагая, что вектор параметров и состояний $x(t)$ математической модели эквивалентен вектору $x_1(t)$ фазовых координат реальной динамической системы.

Полученное выражение (27) с точностью до обозначений совпадает с принятой ранее формой модели состояний для нелинейных бесконечномерных динамических систем, что свидетельствует об инвариантности рассматриваемой формы конечномерной математической модели к воздействию возмущающих факторов в уравнении (20), определяющих условия функционирования (проведения испытания).

Дуальность формального представления моделей состояний. Уравнения конечных моделей состояний можно рассматривать двояко:

– с позиции системы оптимального управления [28]

– с позиции задачи оптимальной фильтрации [15–17]

В первом случае медленно меняющаяся марковская составляющая $u(\cdot)$ в уравнениях состояний (1) может быть отождествлена с вектором оптимального управления, который на каждый временной момент поступления данных обеспечивает перевод динамической системы в такое состояние, которое наилучшим образом (в статистической постановке) согласуется с результатами измерений выходов такой системы в соответствии с выбранными критериями качества.

Во втором случае медленно меняющаяся марковская составляющая $u(\cdot)$ в уравнениях состояний (6) может быть включена в расширенный вектор состояний, что приводит к двухкомпонентной модели состояний — детерминированной и случайной составляющей.

Таким образом, уравнение для нелинейной конечномерной модели состояний

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f[x(t), t] + b[x(t), t] \cdot u(t) + \\ &+ g[x_1(t), t] \cdot \omega(t) \end{aligned} \quad (28)$$

с учетом квазистационарности марковской составляющей $u(\cdot)$ можно записать как

$$\begin{aligned} \dot{x}^*(t) &= \begin{pmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{u}(t) \end{pmatrix} = \\ &= \begin{cases} f[x(t), t] + b[x(t), t] \cdot u(t) + g[x(t), t] \cdot \omega(t) \\ g_u[u(t), t] \cdot \omega(t) \end{cases} \end{aligned}$$

или

$$\dot{x}^*(t) = f[x^*(t), t] + g[x^*(t), t] \cdot \omega(t),$$

где векторная функция $g[x^*(t), t]$ имеет вид

$$g[x^*(t), t] = \left(g^T[x(t), t], g_u^T[u(t), t] \right)^T.$$

Аналогичным образом уравнение для нелинейной конечномерной модели состояний (6) можно выразить следующим образом

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f[x(t), t] + b[x(t), t] \cdot u(t) + \\ &+ g[x_1(t), t] \cdot \omega(t), \end{aligned}$$

с учетом квазистационарности марковской составляющей $u(\cdot)$ можно записать

$$\dot{x}^*(t) = \begin{pmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{u}(t) \end{pmatrix} = \begin{cases} f[x(t), t] + b[x(t), t] \cdot u(t) + \\ + g[x(t), t] \cdot \omega(t) \\ g_u[u(t), t] \cdot \omega(t) \end{cases},$$

или

$$\dot{x}^*(t) = f[x^*(t), t] + g[x^*(t), t] \cdot \omega(t),$$

где векторная функция $g[x^*(t), t]$ имеет вид

$$g[x^*(t), t] = \left(g^T[x^*(t), t], g_u^T[u(t), t] \right)^T.$$

При переходе к дискретным расчетным схемам уравнения (28) конечномерных моделей состояний динамических стохастических систем, приведенных к дискретному времени, можно представить в виде разностного векторного уравнения

$$\begin{aligned} x(k) &= F[k/k-1] \cdot x(k-1) + \\ &+ B[k/k-1] \cdot u(k-1) + G[k/k-1] \cdot w(k-1), \end{aligned} \quad (29)$$

где $F(\cdot)$, $B(\cdot)$, $G(\cdot)$ — переходные матрицы состояний $x(k)$ медленно и быстро меняющихся составляющих $u(\cdot)$ и $w(\cdot)$ формирующего шума, действующего на динамическую систему;

k — характеризует номер временного отсчета.

Это представление будет соответствовать уравнению оптимального управления. Во втором случае, когда решаются задачи фильтрации эквивалентной формой представления модели (29) будет следующая

$$\begin{cases} x(k) = F[k/k-1] \cdot x(k-1) + \\ + B[k/k-1] \cdot u(k-1) + G[k/k-1] \cdot w(k-1) \\ u(k) = B_u[k/k-1] \cdot u(k-1) + \\ + G_u[k/k-1] \cdot w(k-1). \end{cases}$$

или

$$\begin{pmatrix} x(k) \\ u(k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F[k/k-1] & B[k/k-1] \\ 0 & B_u[k/k-1] \end{pmatrix} \times \\ \times \begin{pmatrix} x(k-1) \\ u(k-1) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} G[k/k-1] \\ G_u[k/k-1] \end{pmatrix} \cdot w(k-1). \quad (30)$$

Полученную систему уравнений (30) дискретной модели состояний можно записать более компактно

$$\begin{aligned} \tilde{x}(k) &= \tilde{F}[k/k-1] \cdot \tilde{x}(k-1) + \\ &+ \tilde{G}[k/k-1] \cdot \tilde{w}(k-1), \end{aligned} \quad (31)$$

полагая, что

$$\tilde{x}(k) = \begin{pmatrix} x(k) \\ u(k) \end{pmatrix};$$

$$\tilde{F}[k/k-1] = \begin{pmatrix} F[k/k-1] & B[k/k-1] \\ 0 & B_u[k/k-1] \end{pmatrix};$$

$$\tilde{G}[k/k-1] = \begin{pmatrix} G[k/k-1] \\ G_u[k/k-1] \end{pmatrix}.$$

Различия между формальными представлениями моделей состояний для первого и второго случаев заключаются в том, что медленно меняющаяся марковская составляющая $u(\cdot)$ формирующего шума, которая отождествлялась с вектором оптимального управления в уравнениях (6)–(8) в первом случае, включена непосредственно в вектор состояний $\tilde{x}(\cdot)$ в уравнениях (31) для второго случая. Такой переход между формальными представлениями моделей состояний известен как принцип дуальности оптимального управления и оценивания состояний [29, 30].

Выводы

Математическое представление реальных систем на основе рассматриваемого материала в классе нелинейных нестационарных стохастических позволяет достигнуть адекватности моделей реальной системе по наблюдаемым параметрам, что обеспечит инвариантность математической модели к изменениям условий функционирования динамической системы. Для рассматриваемых

математических моделей полный вектор состояния содержит, как это было отмечено выше, зависимые и независимые компоненты. По этой причине, проведено изучение совместной наблюдаемости и идентифицируемости нелинейных нестационарных моделей состояния, заданных в виде системы стохастических дифференциальных уравнений в форме Ланжевена.

Список литературы

- [1] Красовский А.А. Справочник по теории автоматического управления. М.: Наука, 1987. 712 с.
- [2] Кузнецов В.И. Применимость конечномерных моделей состояния и измерений в задачах параметрической идентификации динамических систем. М.: Двойные технологии, 2008. № 2. С. 38–41.
- [3] Кузовков Н.Т., Салычев О.С. Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация. М.: Машиностроение, 1982. 216 с.
- [4] Ли Р. Оптимальные оценки, определение характеристик и управление. М.: Наука, 1966. 190 с.
- [5] Мехра Р. Идентификация и адаптивная фильтрация Калмана // Механика, 1971. № 3. С. 34–51.
- [6] Кузнецов В.И. Адаптивная фильтрация в задачах параметрической идентификации нестационарных динамических систем. М.: Двойные технологии, 2008. № 1. С. 29–34.
- [7] Кротов В.Ф., Гурман В.И. Методы и задачи оптимального управления. М.: Наука, 1973. 448 с.
- [8] Кукушкин С.С., Гладков И.А., Чаплинский В.С. Методы и информационные технологии контроля состояния динамических систем. М.: Хоружевский А.И., 2008. 328 с.
- [9] Ильин В.А., Садовничий В.А., Сендов Бл.Х., Кузнецов В.И. Математический анализ. М.: Наука, 1979. 720 с.
- [10] Корн Г., Корн М. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Мир, 1982. 831 с.
- [11] Городецкий А.Я. Информационные системы. Вероятностные модели и статистические решения. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. 326 с.
- [12] Венцель А.Д. Курс теории случайных процессов. М.: Наука, 1996. 400 с.
- [13] Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. В 3 кн. Кн. 1. М.: Советское радио, 1974. 552 с.
- [14] Королюк В.С., Поргенок Н.И., Скороход А.В., Турбин А.Ф. Справочник по теории вероятностей и математической статистике. М.: Наука, 1985. 640 с.
- [15] Тихонов В.И., Кульман А.К. Нелинейная фильтрация и квазикогерентный прием сигналов. М.: Советское радио, 1975. 704 с.
- [16] Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. М.: Радио и связь, 1982. 624 с.
- [17] Сейдж Э., Мелс Дж. Теория оценивания и ее применения в связи и управлении. М.: Связь, 1976. 496 с.
- [18] Остром К.Ю. Введение в стохастическую теорию управления. М.: Мир, 1983. 322 с.
- [19] Сосулин Ю.Г. Теория обнаружения и оценивания стохастических сигналов. М.: Советское радио, 1978. 320 с.
- [20] Казаков В.А. Введение в теорию марковских процессов и некоторые радиотехнические задачи. М.: Советское радио, 1973. 232 с.
- [21] Тарасюк А.Е., Мосин Е.Л. Методические указания. Методика расчета тропосферных погрешностей измерения текущих навигационных параметров летательных аппаратов. М.: Гос. комитет по стандартам, 1988. 24 с.

- [22] Волков И.К., Зуев С.М. Цветкова Г.М. Случайные процессы / под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крещенко. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 448 с.
- [23] Инструменты и механизмы устойчивого инновационного развития. Вып. 67 / под ред. А.А. Сукиасяна. Уфа: Аэтерна, 2022. 352 с.
- [24] Тесленко Е.А., Екимова М.Ю., Баранчук Н.А. Оценка технических характеристик динамических систем в статистически неоднородных условиях испытаний // Нейрокомпьютеры и их применение. XIX Всерос. науч. конф.: тезисы докладов. Москва, 30 марта 2021 г. М.: Изд-во Московского государственного психолого-педагогического университета, 2021. С. 104–105.
- [25] Тесленко Е.А., Баранчук Н.А., Екимова М.Ю., Бахурина И.А. Прогнозирование состояний динамических систем в математических экспериментах // Проблемы повышения эффективности научной работы в оборонно-промышленном комплексе России: Материалы IV Всерос. науч.-практ. конф., Знаменск, 15–16 апреля 2021 г. Астрахань: Изд-во Астраханского государственного университета имени В.Н. Татищева, 2021. 433 с.
- [26] Тесленко Е.А., Екимова М.Ю., Баранчук Н.А. Задачи, возникающие при обработке и анализе в процессе проведения сложных экспериментов // Нейрокомпьютеры и их применение. XIX Всерос. науч. конф.: тезисы докладов. Москва, 30 марта 2021 г. М.: Изд-во Московского государственного психолого-педагогического университета, 2021. С. 96–97.
- [27] Формирование и развитие новой парадигмы науки в условиях постиндустриального общества. Коллективная монография. Т. 43. / под редакцией А.А. Сукиасяна. Уфа: Аэтерна, 2021. 204 с.
- [28] Справочник по теории автоматического управления / под ред. А.А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.
- [29] Гроп Д. Методы идентификации систем. М.: Мир, 1979. 302 с.
- [30] Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. М.: Наука, 1966. 190 с.

Сведения об авторах

Тесленко Евгений Алексеевич [✉] — канд. техн. наук, начальник отдела науч.-испытательного центра 4-го Государственного центрального межвидового полигона Министерства обороны Российской Федерации (полигон Капустин Яр) (4 ГЦМП МО РФ), teslenko.zhenka@yandex.ru

Екимова Мария Юрьевна — канд. техн. наук, ст. науч. сотр. науч.-испытательного центра 4-го Государственного центрального межвидового полигона Министерства обороны Российской Федерации (полигон Капустин Яр) (4 ГЦМП МО РФ), mashula111@yandex.ru

Поступила в редакцию 26.05.2023.

Одобрено после рецензирования 06.07.2023.

Принята к публикации 23.08.2023.

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF STUDIED OBJECTS STATES AND MEASUREMENT PROCESSES OF ANALYZED PHYSICAL SYSTEMS

E.A. Teslenko✉, M.Yu. Ekimova

Scientific Testing Center 4 of the State Central Interspecific Landfill of the Ministry of Defense of the Russian Federation, 1, Koroleva st., 416550, Znamensk, Astrakhan reg., Russia

teslenko.zhenka@yandex.ru

The question arising in the process of analyzing physical systems is considered, as well as a mathematical description of the studied objects states and the processes of measuring their output parameters in the process of functioning, which consists in establishing appropriate mathematical models of states, evaluating states and parametric identification of dynamic systems on selected mathematical models based on the measurements results obtained during tests and experiments. Certain forms of mathematical models of states, mathematical models of measurement processes are assumed to identify parameters and evaluate the states of dynamic systems, and be reduced to determining the states and unknown parameters of given models. Estimates of unknown parameters are determined by determining the optimal correspondence of the chosen form of the mathematical model, which determines the depth of its formalization, and the parameters of this model to the available a priori data and measurement results. It is taken into account that optimal parameter estimates can be determined for the selected mathematical model, but this does not a guarantee their suitability in cases where the model is incorrect. The proof of the formulated statement for the case of nonlinear models of states is given. A mathematical model of the states of a dynamic system and a measurement model are developed, the relationship of the equations of states and measurements in the most general case is presented, given in the form of an additive mixture of a useful signal described by a nonlinear measurement equation and random interference. Studies of the properties of state models and measurements using Gaussian and Markov approximations are presented. The subsequent use of the obtained estimates of the states of parameters of dynamic systems on models that are adequate to real systems and measurement processes and their reduction to the conditions of statistical homogeneity is considered.

Keywords: identification, parameters, dynamic system, mathematical model


Suggested citation: Teslenko E.A., Ekimova M.Yu. *Matematicheskoe opisaniye sostoyaniy izuchaemykh ob'ektov i protsessov izmereniy analiziruemyykh fizicheskikh sistem* [Mathematical description of studied objects states and measurement processes of analyzed physical systems]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 6, pp. 178–188. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-178-188

References

- [1] Krasovskiy A.A. *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Handbook on the theory of automatic control]. Moscow: Nauka, 1987, 712 p.
- [2] Kuznetsov V.I. *Primenimost' konechnomernyykh modeley sostoyaniya i izmereniy v zadachakh parametricheskoy identifikatsii dinamicheskikh sistem* [Applicability of finite-dimensional models of state and measurements in problems of parametric identification of dynamical systems]. Moscow: Dvoynye tekhnologii [Double technologies], 2008, no. 2, pp. 38–41.
- [3] Kuzovkov N.T., Salychev O.S. *Inertsial'naya navigatsiya i optimal'naya fil'tratsiya* [Inertial navigation and optimal filtering]. Moscow: Mashinostroenie, 1982, 216 p.
- [4] Li R. *Optimal'nye otsenki, opredeleniye kharakteristik i upravlenie* [Optimal estimates, characterization and control]. Moscow: Nauka, 1966, 190 p.
- [5] Mehra R. *Identifikatsiya i adaptivnaya fil'tratsiya Kalmana* [Identification and adaptive Kalman filtering]. *Mekhanika* [Mechanics], 1971, no. 3, pp. 34–51.
- [6] Kuznetsov V.I. *Adaptivnaya fil'tratsiya v zadachakh parametricheskoy identifikatsii nestatsionarnyykh dinamicheskikh sistem* [Adaptive filtering in problems of parametric identification of non-stationary dynamical systems]. Moscow: Dvoynye tekhnologii [Double technologies], 2008, no. 1, pp. 29–34.
- [7] Krotov V.F., Gurman V.I. *Metody i zadachi optimal'nogo upravleniya* [Methods and problems of optimal control]. Moscow: Nauka, 1973, 448 p.
- [8] Kukushkin S.S., Gladkov I.A., Chaplinskiy V.S. *Metody i informatsionnye tekhnologii kontrolya sostoyaniya dinamicheskikh sistem* [Methods and information technologies for monitoring the state of dynamic systems]. Moscow: Khoruzhevsky A.I., 2008, 328 p.
- [9] P'in V.A., Sadovnichiy V.A., Sendov Bl.Kh., Kuznetsov V.I. *Matematicheskyy analiz* [Mathematical analysis]. Moscow: Nauka, 1979, 720 p.
- [10] Korn G., Korn M. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Handbook of mathematics for scientists and engineers]. Moscow: Mir, 1982, 831 p.
- [11] Gorodetskiy A.Ya. *Informatsionnye sistemy. Veroyatnostnye modeli i statisticheskie resheniya* [Information Systems. Probabilistic models and statistical solutions]. St. Petersburg: Publishing house of SPbGPU, 2003, 326 p.
- [12] Ventsel' A.D. *Kurs teorii sluchaynykh protsessov* [Course in the theory of random processes]. Moscow: Nauka, 1996, 400 p.
- [13] Levin B.R. *Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki* [Theoretical Foundations of Statistical Radio Engineering]. In 3 books. Book. 1. Moscow: Soviet radio, 1974, 552 p.
- [14] Korolyuk V.S., Portenko N.I., Skorokhod A.V., Turbin A.F. *Spravochnik po teorii veroyatnostey i matematicheskoy statistike* [Tech. Handbook of Probability Theory and Mathematical Statistics]. Moscow: Nauka, 1985, 640 p.
- [15] Tikhonov V.I., Kul'man A.K. *Nelineynaya fil'tratsiya i kvazikogerentnyy priem signalov* [Nonlinear filtering and quasi-coherent signal reception]. Moscow: Soviet radio, 1975, 704 p.

- [16] Tikhonov V.I. *Statisticheskaya radiotekhnika* [Statistical radio engineering]. Moscow: Radio and communication, 1982, 624 p.
- [17] Sage E., Mels J. *Teoriya otsenivaniya i ee primeneniya v svyazi i upravlenii* [Theory of evaluation and its applications in communication and management]. Moscow: Radio i svyaz' [Communication], 1976, 496 p.
- [18] Ostrem K.Yu. *Vvedenie v stokhasticheskuyu teoriyu upravleniya* [Introduction to stochastic control theory]. Moscow: Mir, 1983, 322 p.
- [19] Sosulin Yu.G. *Teoriya obnaruzheniya i otsenivaniya stokhasticheskikh signalov* [Theory of detection and estimation of stochastic signals]. Moscow: Soviet radio, 1978, 320 p.
- [20] Kazakov V.A. *Vvedenie v teoriyu markovskikh protsessov i nekotorye radiotekhnicheskie zadachi* [Introduction to the theory of Markov processes and some radio engineering problems]. Moscow: Soviet radio, 1973, 232 p.
- [21] Tarasyuk A.E., Mosin E.L. *Metodicheskie ukazaniya. Metodika rascheta troposfernykh pogreshnostey izmereniya tekushchikh navigatsionnykh parametrov letatel'nykh apparatov* [Methodical instructions. Method for calculating tropospheric errors in measuring the current navigation parameters of aircraft]. Moscow: State. standards committee, 1988, 24 p.
- [22] Volkov I.K., Zuev S.M., Tsvetkova G.M. *Sluchaynye protsessy* [Random Processes]. Ed. V.S. Zarubin, A.P. Kreshchenko. Moscow: Publishing house of MSTU im. N.E. Bauman, 2006, 448 p.
- [23] *Instrumenty i mekhanizmy ustoychivogo innovatsionnogo razvitiya* [Tools and mechanisms for sustainable innovative development]. Iss. 67. Ed. A.A. Sukiasyan. Ufa: Aeterna, 2022, 352 p.
- [24] Teslenko E.A., Ekimova M.Yu., Baranchuk N.A. *Otsenivanie tekhnicheskikh kharakteristik dinamicheskikh sistem v statisticheski neodnorodnykh usloviyakh ispytaniy* [Estimation of technical characteristics of dynamic systems in statistically inhomogeneous test conditions]. Neyrokomp'yutery i ikh primeneniye. XIX Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya: tezisy dokladov [Neurocomputers and their application. XIX All-Russian scientific conference: abstracts of reports]. Moscow, March 30, 2021. Moscow: Moscow State University of Psychology and Education, 2021, pp. 104–105.
- [25] Teslenko E.A., Baranchuk N.A., Ekimova M.Yu., Bakhurina I.A. *Prognozirovanie sostoyaniy dinamicheskikh sistem v matematicheskikh eksperimentakh* [Forecasting the states of dynamic systems in mathematical experiments]. Problemy povysheniya effektivnosti nauchnoy raboty v oboronno-promyshlennom komplekse Rossii: mater. IV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Problems of increasing the efficiency of scientific work in the military-industrial complex of Russia: mater. IV All-Russian Scientific and Practical Conference], Znamensk, April 15–16, 2021. Astrakhan: Astrakhan Tatishchev State University, 2021. 433p.
- [26] Teslenko E.A., Ekimova M.Yu., Baranchuk N.A. *Zadachi, voznikayushie pri obrabotke i analize v protsesse provedeniya slozhnykh eksperimentov* [Problems arising during processing and analysis, in the process of complex experiments]. Neyrokomp'yutery i ikh primeneniye. XIX Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya: tezisy dokladov [Neurocomputers and their application. XIX All-Russian scientific conference: abstracts of reports]. Moscow, March 30, 2021. Moscow: Moscow State University of Psychology and Education, 2021. P. 96–97.
- [27] *Formirovanie i razvitiye novoy paradigmy nauki v usloviyakh postindustrial'nogo obshchestva. Kollektivnaya monografiya. T. 43* [Formation and development of a new paradigm of science in a post-industrial society. Collective monograph. T. 43]. Ed. by A.A. Sukiasyana. Ufa: Aeterna, 2021, 204 p.
- [28] *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Handbook on the theory of automatic control]. Ed. A.A. Krasovskiy. Moscow: Nauka, 1987, 712 p.
- [29] Grop D. *Metody identifikatsii sistem* [Methods for identifying systems]. Moscow: Mir, 1979, 302 p.
- [30] Eickhoff P. *Osnovy identifikatsii sistem upravleniya* [Fundamentals of identification of control systems]. Moscow: Nauka, 1966, 190 p.

Authors' information

Teslenko Evgeny Alekseevich  — Cand. Sci. (Tech.), Head of the Department of the Scientific Testing Center of the 4th State Central Interspecific Polygon of the Ministry of Defense of the Russian Federation, teslenko.zhenka@yandex.ru

Ekimova Mariya Yur'evna — Cand. Sci. (Tech.), Senior researcher at the Research and Testing Center of the 4th State Central Interspecific Landfill of the Ministry of Defense of the Russian Federation, mashula111@yandex.ru

Received 26.05.2023.

Approved after review 06.07.2023.

Accepted for publication 23.08.2023.

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

ВИХРЕВОЙ ТЕПЛООБМЕННИК ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТЕПЛА И ХОЛОДА

А.Н. Шульц

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

shultsalek@mail.ru

Рассмотрены возможности создания холодильной машины на основе испарительно-конденсационного цикла с использованием физических процессов, протекающих в тепловых трубах и абсорбционных холодильных машинах исходя из опыта исследования тепло- и массообмена при запуске тепловых труб из замороженного состояния теплоносителя. Выявлены вихревые структуры в паровом канале, создающие реальные границы, в пределах которых происходит формирование нестационарного парокапельного потока. Установлено, что поток влажного пара перемещается под влиянием вихревых структур, изменяющихся по интенсивности и направлению вращения. Предложены варианты построения испарительно-конденсационных теплообменников по принципу термодинамического цикла холодильной машины, рекомендуемые для использования при утилизации тепловых ресурсов, полученных при производстве холода или тепла в тепловых насосах.

Ключевые слова: испарение, конденсация, холодильник, тепловая труба, абсорбция, вихрь

Ссылка для цитирования: Шульц А.Н. Вихревой теплообменник для производства тепла и холода // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 6. С. 189–198. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-189-198

Возрастающие потребности общества в энергетических ресурсах вызывают интерес к поиску новых решений по утилизации тепловых ресурсов любого происхождения. Для выполнения этой задачи целесообразно обратиться к содержанию новых современных подходов к разработке холодильных машин, в которых используются испарительно-конденсационные циклы тепловой трубы. (ТТ).

Необходимая информация о достигнутых результатах в области исследования нестационарного парового потока в ТТ имеется в литературных источниках [1–4]. Наши исследования проводились с помощью оптических средств контроля на установке, созданной в лаборатории физики Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Длительное время тепловые трубы рассматривались как испарительно-конденсационные теплообменники (ИКТ), предназначенные для трансформации и передачи тепловых потоков.

Известно, что термодинамический цикл холодильных машин может быть использован как для производства холода, так и тепла (в тепловых насосах), что и привлекает внимание исследователей, разрабатывающих новые устройства для утилизации тепла различных источников.

Цель работы

Цель работы — расширение области применения тепловых труб для получения новых тепло-

физических свойств и потребительских качеств промышленных энергетических установок и бытовой техники.

Результаты исследования

Эксперимент был проведен в плоском канале рабочего участка тепловой трубы. Нестационарный паровой поток подсвечивали лазерным лучом в виде плоского светового пучка. В подсвеченной области трубы свет рассеивался по индикатрисе рассеяния [5, 6]. В результате в плоском канале трубы были обнаружены следующие явления [1, 2, 4, 7–10]:

- оптические неоднородности различного происхождения;
- вихри в виде вращающихся цилиндрических валов;
- вращение валов в испарителе поперек направления движения пара, в конденсаторе — вдоль;
- в области вдува валы создавали границы в виде сопла Лавая.

Возникновение капель жидкой фазы происходило в результате гетерофазных флуктуаций в паре [11–13]. Движение этих капель наблюдалось в эксперименте и зафиксировано фоторегистратором. Таким образом обнаружены реальные границы парового потока.

Гидродинамика парового потока. Как правило, расчет гидродинамики выполняют по модели идеального газа [14, 15]. Однако для двухфазного потока она не подходит, поскольку наличие жид-

кости в паре изменяет показатель его адиабаты C_p/C_v , упругость, скорость звука, число Маха. По этой причине расчет потерь давления не выполняется по модели идеального газа. В литературе [11–13, 16] опубликованы экспериментальные данные о зарегистрированных случаях наблюдения состояний в виде скачков уплотнения, подобных ударным волнам в идеальном газе.

В любых устройствах, в которых происходит течение жидкости и пара в противоположных направлениях, на межфазных границах возникают касательные напряжения, тормозящие оба потока. При высокой скорости и встречном движении потоков один из них может прекратить движение и даже начать двигаться в обратном направлении. Момент возникновения такой ситуации определяется по критерию Вебера [13]

$$We = (\rho v^2 d)/(\sigma) > 1,$$

где d — ширина канавки фитиля.

Это явление создает дополнительное сопротивление, ограничивающее капиллярный напор в тепловой трубе, и максимальный теплоперенос. Его можно использовать для создания механического насоса дополнительно к капиллярному. Для этого вносятся изменения в конструкцию ТТ и создается спутное течение пара и жидкости. Идея подобной реконструкции появилась в результате изучения структуры парового потока в ТТ. Поскольку реальные границы в потоке создают вихревые структуры, то спутное течение в конденсаторе может осуществляться путем введения циркуляционного контура в конденсатор. Подобная схема предложена в работе [3]. Энергия парового потока в такой схеме течения передается жидкой фазе путем влияния касательных напряжений в открытых капиллярных канавках. Механический насос, созданный подобным образом, дополнительно к капиллярному, высокоэффективен. Согласно одной оценке [1], работа, совершаемая в контуре, значительно превышает работу капиллярных сил. Другие оценки [13] показывают, что изменение знака касательных напряжений повышает расход жидкого теплоносителя в 6 раз.

Применение массовых сил для реконструкции тепловых труб. При вращении всего устройства [17] вокруг оси симметрии возникает поле центробежных сил. Изменение угла наклона внутренней поверхности к оси вращения его основных элементов (испарителя, конденсатора и др.) позволяет управлять полями массовых сил в разных частях всего устройства. При вертикальном расположении оси ТТ можно частично или полностью скомпенсировать гравитационные силы. Массовые силы могут полностью заменить

капиллярные. Кроме того, происходит дегазация теплоносителя, что улучшает его качество и смещает в сторону высоких температур эффект Лейденфроста.

Экспериментальным путем выявлены возростание коэффициента тепло- и массообмена и возникновение сепарационного эффекта, способствующие удалению зародышей жидкой фазы из потока и прекращающие рост капель. Вследствие этого происходит равномерное распределение потока конденсирующейся (или испаряющейся) фазы на теплообменные поверхности. При этом вращение интенсифицирует внутренний и внешний теплообмен.

В абсорбционных холодильных машинах важным элементом является абсорбер. В традиционных холодильных машинах он выполняется в виде сосуда-сборника крепкого раствора бинарной смеси хладагента и абсорбента. Абсорбер можно выполнить в виде пористого тела с каналами для перетока бинарной смеси между областями с разной пористостью. При вращении такого абсорбера вокруг оси *вихревого теплообменника для производства тепла и холода* (ВТТХ), можно осуществить запланированный перенос бинарной смеси в разные его участки, например, осуществить перенос из оребренной поверхности пористого тела, обращенной к капиллярной поверхности испарителя морозильной камеры, в пористое тело — сборник крепкого раствора [18–20]. Природа такого конвективного переноса объясняется действием центробежных сил: давление жидкости во внешних слоях больше, чем во внутренних. Непрерывное обновление раствора в пористых слоях, обращенных к открытым межфазным поверхностям фитиля испарительной камеры, происходит на малом расстоянии. В этом случае можно рассчитывать на высокую эффективность переноса испаряющейся массы хладагента в тело пористого абсорбера.

При быстром вращении ВТТХ возможен выброс капель из пористого тела абсорбера морозильной камеры, тогда рассматривается применение сепаратора, состоящего из набора изогнутых пластин и выполняющего роль дефлегматора.

Выбор теплоносителя для вихревого теплообменника для производства тепла и холода. Создать холодильную машину можно в виде двух разновидностей: 1) парожетторной (пароструйной); 2) абсорбционной. В холодильной машине выбор теплоносителя обусловлен температурой, которую необходимо создать для хранения продуктов. В парожетторных машинах применяются легкокипящие теплоносители: вода, аммиак, фреон и др. Вода является хорошим хладагентом вследствие высокой теплоты испарения — в 2 раза выше аммиака.

В абсорбционных холодильных машинах используются бинарные смеси. Они состоят из хладагента (воды, аммиака) и абсорбента (бромистого лития, воды).

Абсорбционные холодильные машины выгоднее с точки зрения энергозатрат, поскольку абсорбент активно поглощает пары легкокипящего компонента с более низкой температурой при том же давлении [10, 21–24].

Компоненты на основе воды и бромистого лития безвредные и используются в системе кондиционирования зданий.

Построение новых схем холодильных машин.

Современные холодильные машины выполнены из элементов различного назначения. Они разнесены в пространстве и соединены между собой трубопроводами. В итоге готовое изделие имеет большие габариты и массу. Опыт создания тепловых труб позволяет использовать его для создания компактных холодильных машин различного назначения [21–23]. Рассмотрим схемы существующих холодильных машин (рис. 1, 2). [2].

Тепловые трубы можно использовать для построения новых схем холодильных машин. В качестве насоса жидкой фазы в этом случае выступают: капиллярные силы, тепловые ресурсы парового потока, массовые силы от полей сил тяжести и центробежных сил.

Из всего многообразия принципиальных схем холодильных машин рассмотрим принципиальные схемы пароструйной (эжекторной) и абсорбционной машин, а также их основные элементы и принцип работы.

Производство холода в них основано на испарении хладагента в морозильной камере. Процесс испарения в пароструйной (эжекторной) холодильной машине создается путем понижения давления над межфазной поверхностью хладагента, в абсорбционной — путем поглощения паров хладагента в процессе абсорбции.

Реализация парозжекторной холодильной машины на основе тепловой трубы. В схеме (рис. 3) реализован опыт построения тепловой трубы с использованием эксергетических ресурсов парового потока для создания механического насоса дополнительно к капиллярному.

Устройство работает следующим образом. При подводе тепла к испарителю (3) хладагент испаряется и давление в нем повышается. Паровой поток ускоряется в сопловом аппарате эжектора (4) и совершает работу по отсосу паров из испарительной камеры (7). Этот процесс понижает давление в испарительной камере холодильника (7) и ускоряет тепло- и массоперенос на межфазной поверхности фитиля. Холодопроизводительность ВТТХ зависит от расхода испаряющегося в морозильной камере хладагента. Далее паровой

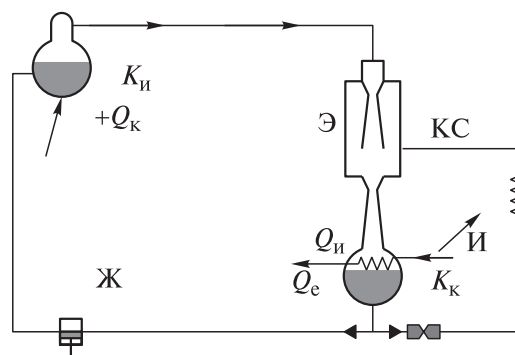


Рис. 1. Принципиальная схема парозжекторной холодильной машины: К_к — кипятильник; Э — эжектор; К/С — камера смешения; И — испаритель; К_и — конденсатор; Ж — насос абсорбера; +Q_к — теплоподвод к кипятильнику; Q_и — теплоподвод к испарителю; Q_е — теплоотвод из конденсатора

Fig. 1. Schematic diagram of a steam-ejector refrigerating machine: К_к — boiler; Э — ejector; К/С — mixing chamber; И — evaporator; К_и — condenser; Ж — absorber pump; +Q_к — heat supply to the boiler; Q_и — heat supply to the evaporator; Q_е — heat sink from the condenser

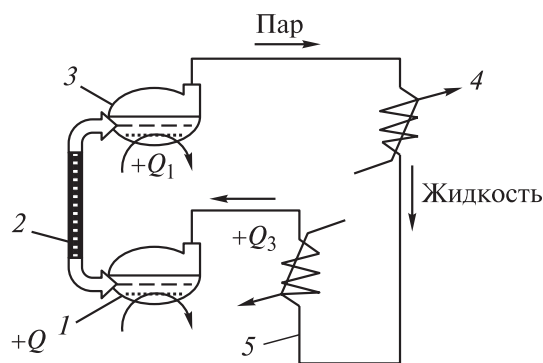


Рис. 2. Принципиальная схема абсорбционной холодильной машины: 1 — абсорбер; 2 — насос; 3 — генератор; 4 — конденсатор; 5 — испаритель

Fig. 2. Schematic diagram of the absorption refrigerating machine: 1 — absorber; 2 — pump; 3 — generator; 4 — condenser; 5 — evaporator

поток, содержащий пары хладагента, извлеченные из испарителя и основного потока, движутся в конденсатор.

В конце конденсатора располагается устройство, выполненное в соответствии с экспериментально выявленными границами вихревой структуры в торце тепловой трубы [2]. В начале конденсатора имеется второй эжектор. Он служит для формирования вихревой структуры и получения спутного потока пара и жидкости. Капиллярная структура в конденсаторе выполнена в виде канавок, заполненных жидким хладагентом с открытой межфазной поверхностью. Часть энергии парового потока совершает работу по перекачиванию хладагента подобно капиллярному насосу. Конденсированная фаза дросселируется через пористую вставку

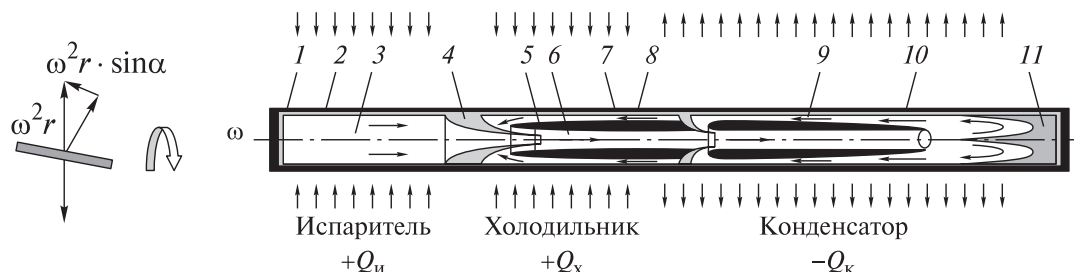


Рис. 3. Принципиальная схема модифицированной тепловой трубы с холодильным эффектом: 1 — корпус; 2 — фитиль; 3 — испаритель; 4 — сопло эжектора; 5 — осесимметричная вставка; 6 — камера смешения; 7 — испаритель холодильника; 8 — холодильная камера; 9 — канал конденсатора; 10 — капиллярные канавки специальной формы; 11 — диффузор; стрелками показано направление движения пара; стрелкой показано направление вращения корпуса тепловой трубы для создания массовых сил; $\omega = (2\pi n)/60$; α — угол между осью тепловой трубы и поверхностью фитиля

Fig. 3. Principle scheme of the modified heat pipe with refrigeration effect: 1 — body; 2 — wick; 3 — evaporator; 4 — ejector nozzle; 5 — axisymmetric insert; 6 — mixing chamber; 7 — refrigerator evaporator; 8 — refrigeration chamber; 9 — condenser channel; 10 — capillary grooves of special shape; 11 — diffuser; arrows show the direction of vapour movement; arrow shows the direction of heat pipe body rotation to create mass forces; $\omega = (2\pi n)/60$; α — angle between the heat pipe axis and the wick surface

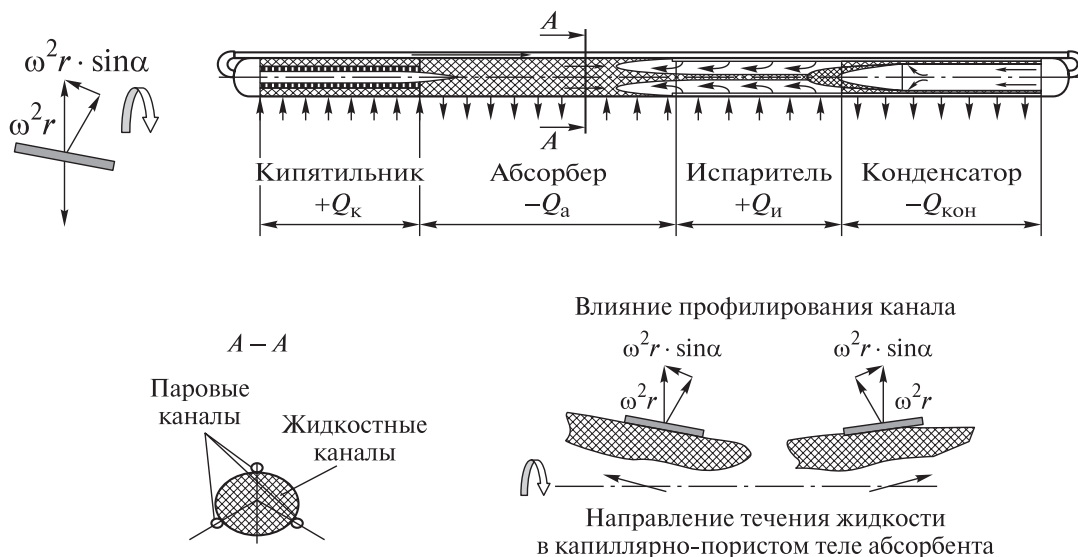


Рис. 4. Схема абсорбционной холодильной машины на базе тепловой трубы (стрелкой показано направление вращения)

Fig. 4. Scheme of the absorption refrigerating machine based on heat pipe (arrow shows the direction of heat pipe body rotation)

в испаритель морозильной камеры. Одна часть поступившего хладагента испаряется и создает холодильный эффект, другая — используется эжектором, третья — через пористую вставку первого эжектора (4) поступает в основной испаритель (3).

Построение абсорбционной холодильной машины на базе тепловой трубы. Схема ВТХ (рис. 4) обладает дополнительными полезными свойствами:

1) обводные каналы передают пары хладагента мимо горячей зоны абсорбера;

2) часть абсорбера выводится из зоны нагрева и частично охлаждается парами хладагента, завершившими холодильный цикл;

3) в обводные каналы можно включить дефлегматор для очистки паров от капель жидкости (этот элемент обычно есть в схемах бытовых абсорбционных холодильников).

Дефлегматор — устройство, предназначенное для точного разделения фракций в процессе перегонки путем их охлаждения. Длина царги сравнима с длиной ТТ. Однако встраивание дефлегматора в данную схему требует вертикального расположения ТТ, а также создания емкости — сборника жидкой фракции в нижней части устройства (на рис. 3 он не указан).

Недостаток схемы (см. рис. 4) заключается в том, что обводные каналы должны быть размещены за пределами корпуса ТТ и иметь хорошую

теплоизоляцию. Но это неудобство можно решить компромиссно, без серьезного ущерба для ХМ.

Устройство абсорбера. Абсорбер (см. рис. 4) состоит из трех частей, расположенных вдоль тепловой трубы последовательно: 1 — кипятильник абсорбера $+Q$; 2 — охлаждаемая часть абсорбера; $-Q$; 3 — испаритель (элемент морозильной камеры) — поглощает тепло охлаждаемых продуктов $+Q$. Изображенный на рис. 4 элемент, обозначенный как конденсатор, не относится к абсорберу. Его функция заключается в охлаждении и конденсации паров хладагента, а жидкая фаза выводится через пористую вставку в испаритель морозильной камеры.

Все части абсорбера выполняются в виде пористого тела. Часть объема в кипятильнике предназначена для сбора бинарной смеси и изготовлена в виде зерен с крупной пористостью. Она должна иметь плотный термический контакт с корпусом. Обращенная внутрь часть пористого тела выполнена в виде ребер с мелкой пористостью. Это необходимо для исключения выброса мелких капель в паровой поток при высоких тепловых нагрузках.

В массивном теле пористого абсорбера при вертикальном расположении и вращении его вокруг оси ВТТХ возникают циркуляционные зоны за счет действия массовых сил. На рис. 5 показаны эта область и направление движения бинарной смеси [19, 20, 25].

В данную область увлекается обедненная смесь из испарителя морозильной камеры и переносится в кипятильник. Подведенное тепло расходуется на испарение хладагента. Далее его пары передаются через обводные каналы в конденсатор, где при отводе тепла превращаются в жидкость. Таким образом, завершается цикл работы абсорбционной ВТТХ.

Объединение парозжекторной и абсорбционной холодильных машин. Рассмотренные выше схемы (см. рис. 1–5) содержат одинаковые по своему назначению части, но выполненные по-разному — это испаритель, холодильник и конденсатор. Целесообразно рассмотреть объединение этих схем для получения нового качества. В этих целях необходимо осуществить следующие работы:

- 1) выполнить осесимметричные вставки в испарителе и холодильнике из пористого материала;
- 2) пропитать их бинарной смесью;
- 3) объединить каналами для потока хладагента;
- 4) выполнить в испарителе абсорбер (см. рис. 6, б) с большой развитой поверхностью (оребреной) и открытой пористостью;
- 5) обеспечить закрытую пористость внутренней поверхности, образующей канал эжектора.

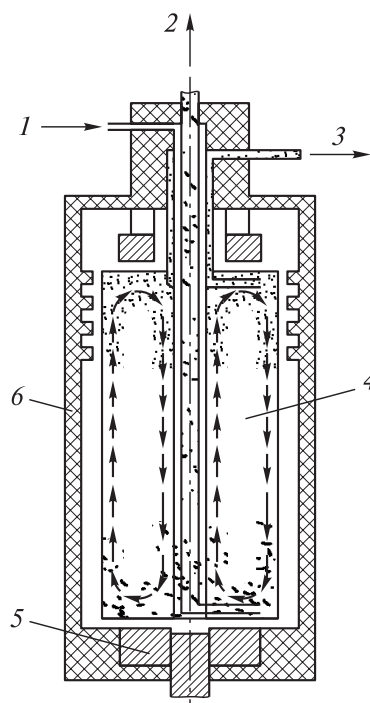


Рис. 5. Возникновение циркуляционных зон в абсорбере при вращении тепловой трубы: 1 — подача смеси; 2 — обогащенная фракция; 3 — обедненная фракция; 4 — циркуляционная зона; 5 — электродвигатель; 6 — корпус

Fig. 5. Example of the occurrence of circulation zones in the absorber during the rotation of the heat pipe: 1 — supply of the mixture; 2 — enriched fraction; 3 — depleted fraction; 4 — circulation zone; 5 — electric motor; 6 — housing

Тогда одновременно будут происходить два процесса: испарение, стимулированное эжектором, и поглощение, стимулированное абсорбером. При их совместной работе можно достичь значительного увеличения расхода хладагента в испарительной камере холодильника.

Осесимметричная вставка в конденсаторе (на рис. 6 не показана) может быть выполнена по схеме, изображенной на рис. 3. В данной схеме она не имеет принципиального значения, ее введение в контур конденсатора определяется расчетным путем. При положительной оценке она будет выполнять две функции: создавать спутные потоки пара в конденсаторе, охлаждать и ускорять поток хладагента движущегося к испарительной камере 5 (морозильнику). При вращении ТТ вокруг оси в пористых телах обеих вставок возникнет циркуляция бинарной смеси в соответствии с влиянием массовых сил от вращения ТТ (см. рис. 6). Циркуляция возникает между слоями по-разному удаленных от оси вращения. Поскольку каналы соединяются со сборником абсорбера испарителя, который нагревается тепловым источником, происходит завершение циркуляции хладагента. Так происходит цикл новой модернизированной ХМ — (ВТТХ).

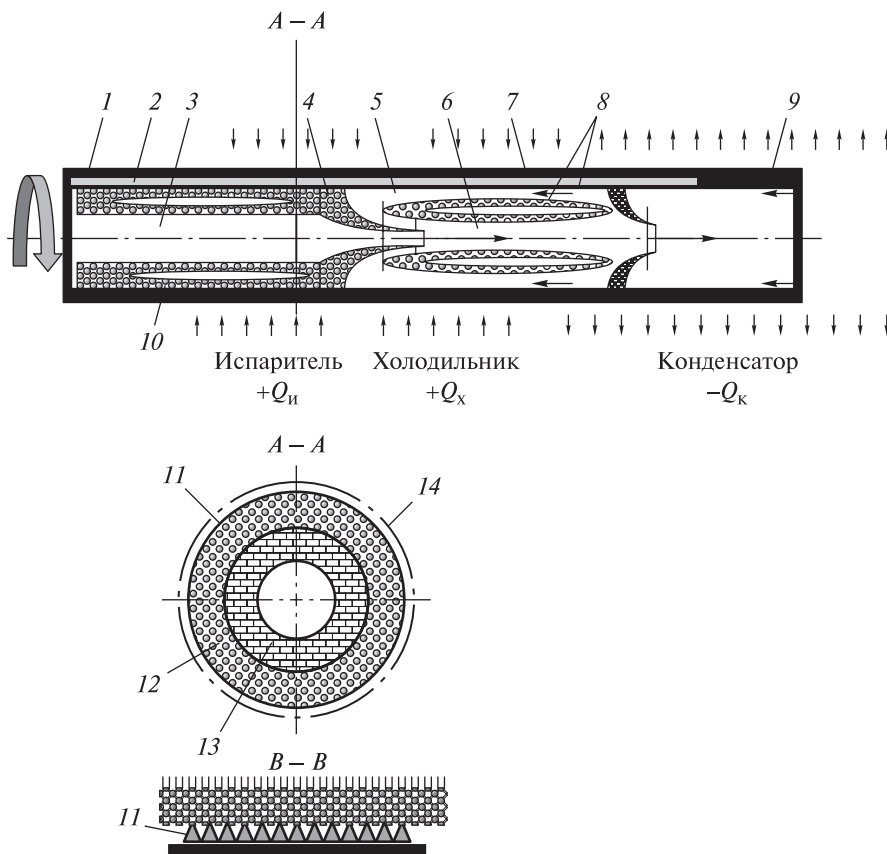


Рис. 6. Схема модифицированной тепловой трубы с холодильным эффектом: 1 — корпус; 2 — фитиль; 3 — испаритель; 4 — сопло эжектора; 5 — корпус морозильной камеры; 6 — камера смешения; 7 — испаритель холодильника; 8 — области циркуляции бинарной смеси; 9 — конденсатор; 10 — корпус испарителя; 11 — фитиль; 12 — пористое тело абсорбера; 13 — ребра теплообменника абсорбера; 14 — камера абсорбера; 15 — конструкция подложки фитиля

Fig. 6. Scheme of the modified heat pipe with refrigerating effect: 1 — body; 2 — wick; 3 — evaporator; 4 — ejector nozzle; 5 — freezer body; 6 — mixing chamber; 7 — refrigerator evaporator; 8 — binary mixture circulation areas; 9 — condenser; 10 — evaporator body; 11 — wick; 12 — absorber porous body; 13 — absorber heat exchanger ribs; 14 — absorber chamber; 15 — wick substrate construction

Результаты объединения схем вихревого теплообменника для производства тепла и холода.

Холодопроизводительность устройств зависит от расхода хладагента в испарительной камере (морозильнике). В парозежекторной ХМ (см. рис. 1) это обеспечивается работой эжектора, в абсорбционной машине — процессом поглощения паров хладагента (см. рис. 2).

В новой схеме (см. рис. 6) расход хладагента совмещается в одной испарительной камере. Эти процессы не являются антагонистами. Совместное протекание их увеличивает расход хладагента и, следовательно, холодопроизводительность ВТТХ.

Вращение тепловой трубы создает поле массовых сил. Профилирование канала изменением угла раскрытия каждой из камер и вращением создают циркуляционные зоны (см. рис. 6, 8) в пористых телах абсорбера. Обновление бинарной

смеси в пористых телах значительно повышает эффективность массообмена. Для повышения площади испарения (см. рис. 6, 13) или поглощения (см. рис. 6, 5) соответственно пористые тела абсорберов снабжены пластинками, изготовленными из того же материала (см. рис. 6). Фитиль абсорбера испарителя предлагается выполнить по принципу обратно-менискового испарения. Такой фитиль используется в тепловых трубах при высоких удельных тепловых нагрузках порядка 10^4 Вт/м². При таких нагрузках жидкость из каналов вытесняется в пористое тело и мениски переворачиваются в сторону падающего потока.

Обзор современных схем абсорбционных холодильных машин. Холодильная техника на основе процессов абсорбции имеет преимущества и недостатки. Рассмотрим их [18, 21–24, 28].

К преимуществам можно отнести полную бесшумность, поскольку нет вращающихся и

трущихся узлов, в 2 раза меньшее потребление электроэнергии (по сравнению с компрессорными), длительный срок службы, разнообразие моделей по габаритам, объему камер. При этом газовые (или керосиновые) версии абсорбционных холодильных машин еще более экономичны и пригодны для применения в полевых условиях. Тем не менее абсорбционная техника уступает компрессорной по холодопроизводительности на единицу объема. Эффективность охлаждения у них зависит от положения корпуса в пространстве. При наклоне ХМ может прекратить работу. Кроме того, эти машины отличаются высокой стоимостью при одинаковой вместительности холодильной камеры по сравнению с компрессорными аналогами.

Разработанные схемы вихревых тепловых труб для производства тепла и холода отличаются следующими преимуществами:

- компактностью;
- малой массой;
- малым потреблением электроэнергии (она требуется только на вращение);
- потреблением тепла от любых источников;
- сохранением работоспособности при посторонних воздействиях: вибрации, ориентации в пространстве, ускорениях;
- возможностью увеличения производительности холода путем сборки в одной холодильной машине нескольких тепловых труб (от двух и более);
- возможностью массового производства в связи с простотой комплектующих деталей.

В качестве недостатка отметим необходимость защиты от шума при вращении.

Утилизации тепла двигателя внутреннего сгорания. Современные двигатели внутреннего сгорания (ДВС) имеют КПД не более 37 %, поэтому ВТТХ целесообразно использовать для утилизации выхлопных газов ДВС на рефрижераторах. При вертикальном расположении ВТТХ легко «вписываются» в схему рефрижератора для выработки холода, охлаждения продуктов питания при перевозке на дальние расстояния. Использование элементов ВТТХ в этих целях практически совпадает с использованием современных рефрижераторов (рис. 7).

Оценка теплофизических качеств разработанного вихревого теплообменника для производства тепла и холода. Теплообменники на основе испарительно-конденсационного цикла тепловой трубы представляют собой термодинамически неравновесную систему. Рост удельных тепловых нагрузок сопровождается вторжением рабочего тела вглубь области метастабильного состояния. При этом повышается значение процессов гомогенной нуклеации флуктуационного

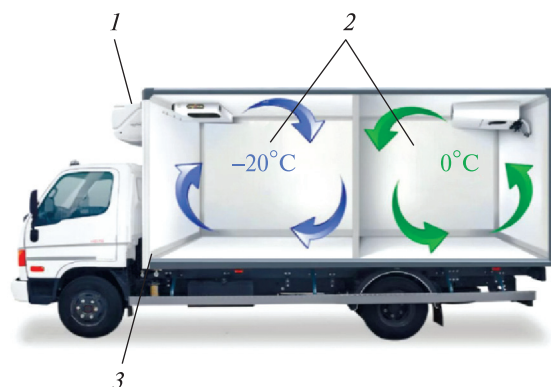


Рис. 7. Схема расположения теплообменников в современных рефрижераторах: 1 — конденсатор; 2 — испаритель; 3 — абсорбер

Fig. 7. Scheme of heat exchangers arrangement in modern refrigerators: 1 — condenser; 2 — evaporator; 3 — absorber

происхождения. Они обеспечивают протекание таких динамических явлений, как взрывообразное вскипание теплоносителя, неустойчивость межфазных границ, спонтанную гомогенно-гетерогенную объемную конденсацию в паровом потоке. Влияние этих процессов можно значительно ослабить изменением схемы парожидкостного тракта и конструкции фитилей, а также воздействием на рабочую среду полями различной физической природы.

Концепция построения новых принципиальных схем устройств для утилизации низкопотенциальных тепловых ресурсов заключается в выполнении следующих условий:

- 1) в организации спутных струй пара и жидкого теплоносителя во всех зонах теплообмена;
- 2) использовании эксергетических ресурсов парового потока в конденсаторе для преобразования кинетической энергии пара в дополнительный (к капиллярному) движущийся перепад давления в жидкости в результате влияния касательных напряжений на межфазной поверхности в открытых капиллярных канавках;
- 3) использовании полей массовых сил от гравитации и вращения устройства вокруг оси для получения дополнительного (к капиллярному) движущего перепада давления в жидкости;
- 4) введении в паровой тракт бинарных смесей для получения цикла абсорбционной холодильной машины;
- 5) использовании влияния электрических полей на интенсификацию процессов тепло- и массообмена в конденсаторе;
- 6) применении конструкции фитиля по принципу обратно-менискового испарения.

Перечислим основные преимущества разработанного ВТТХ:

- 1) отсутствие зависимости от направления вектора гравитационного поля;

2) отсутствие существенных ограничений по габариту и массе;

3) отсутствие зависимости режима работы от влияния электромагнитных полей, радиации, вибрации;

4) зависимость производительности холода только от внешних тепловых источников;

5) малое потребление электроэнергии, так как она, в основном, требуется только на вращение;

6) теплоподведение от внешнего источника, например от излучения солнца, сгорания топлива, геотермальных источников и т. д.;

7) возможность изготовления малогабаритных изделий для нужд бытовой техники: холодильников, систем кондиционирования, туристического оборудования, микроэлектроники и др.;

8) использование в труднодоступных удаленных местах при отсутствии источников электричества в качестве термосифона для замораживания грунта [29, 30];

9) возможность использования в качестве теплового насоса для обогрева бассейнов, зданий, а также в качестве кондиционеров для охлаждения помещений.

Выводы

Доказана возможность создания холодильной машины на основе испарительно-конденсационного цикла тепловой трубы. В данном устройстве в одном парожидкостном тракте совмещены процессы, происходящие в цикле работы холодильной машины. Благодаря этому устройство имеет небольшие габариты и массу, высокие теплофизические и потребительские качества. Использование ВТТХ целесообразно в различных технологических процессах, а также для утилизации тепловых ресурсов.

Список литературы

[1] Васильев Л.Л. Тепловые трубы для нагрева и охлаждения грунта // Инженерно-физический журнал, 1987. Т. 52. № 4. С. 676–687.

[2] Патент № 2031347 Российская Федерация, 6F 28 D 1502. Тепловая труба / В.Н. Харченко и др. № 4949383/06; опубл. 20.03.95, Бюл. № 8. 5 с.

[3] Афанасьев А.С., Полушкин В.М., Соболев В.А., Суслов В.М., Котов Ю.Т., Знаменская Т.Д. Влияние внешней воздействующей вибрации на микроэлектромеханические системы-акселерометры // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2019. Т. 23. № 5. С. 138–143.

[4] Ван Ойен Х., Хогендорн К.Дж. Расчеты течения пара в плоской тепловой трубе // Ракетная техника и космонавтика, 1979. Т. 17. № 11. С. 122–132.

[5] Шифрин К.С., Голиков В.И. Определение спектра капель методом малых углов // Труды 6-й межведомственной конференции по исследованию облаков, осадков и грозового электричества АН СССР, 1960. С. 2–33

[6] Hannes H. Inerferometrische Messung der thermischen Energie von elektrischen Funken // Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens A, 1963, no. 29, pp. 169–175.

[7] Варапаев В.Н., Ягодкин В.И. Об устойчивости течения в каналах с пронизаемыми стенками // Механика жидкости и газа, 1969. № 5. С. 91–95.

[8] Варапаев В.Н. Течение вязкой жидкости в начальном участке плоского канала с пористыми стенками // Механика жидкости и газа, 1969. № 4. С. 179–181.

[9] Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1969. С. 31–32.

[10] Шульц А.Н. Определение энтальпии неравновесного парового потока // Труды 4-й Рос. нац. конф. по теплообмену. Москва, 23–27 октября 2006 г. Т. 5. М.: Изд-во МЭИ, 2006. С. 329–332.

[11] Павлов П.А. Динамика вскипания сильно перегретых жидкостей / под ред. В.П. Скрипова. Свердловск: Изд-во АН СССР, 1988. 243 с.

[12] Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкости. М.: Изд-во АН СССР, 1945. С. 4–29

[13] Хуфшмидт В., Бурк Е., Кола Г., Хофман Г. Влияние касательных напряжений, возникающих при движении пара, на ламинарный поток жидкости в капиллярах тепловых труб // Тепловые трубы. М.: Мир, 1972. 203 с.

[14] Воропаев В.Н., Ягодкин В.И. Об устойчивости некоторых непараллельных течений вязкой несжимаемой жидкости в канале // Механика жидкости и газа, 1970. Вып. № 4. С. 125–129.

[15] Дейч М.Е., Филиппов Г.А. Газодинамика двухфазных сред. М.: Энергия, 1968. 423 с.

[16] Пожилов А.А., Зайцев Д.К., Смирнов Е.М., Смирновский А.А. Численное моделирование тепломассопереноса в трехмерной модели испарителя контурной тепловой трубы // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки, 2017. Т. 10. № 3. С. 52–63. DOI: 10.18721/JPM/10305

[17] Ponapan R., Leland J.E. Rotating heat pipe for cooling of rotor in advanced generators // 6th Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference, 1994, no. 6, pp. 1–10. DOI:10.2514/6.1994-2033

[18] Бараненко А.В., Бухарин Н.Н., Пекарев В.И., Сакун И.А. Холодильные машины / под ред. Л.С. Тимофеевского. СПб.: Политехника, 1997. 992 с.

[19] Геннадий Соловьев «Наша центрифуга нужна американцам» // Атомная энергия, 11 июня 2011. URL: <https://www.atomic-energy.ru/interviews/2015/05/06/23342> (дата обращения 02.10. 2022).

[20] Мастеров В.Б., Глебов А.А., Краснородько А.Б., Батеев С.В. Концептуальный подход к анализу риска использования ядерных материалов в неэнергетических целях // Эффективное антикризисное управление, 2012. № 5 (74). С. 92

[21] Саткевич А.А. Абсорбционная холодильная установка. Л.: Транспечать, 1930. 112с.

[22] Бадилькес И.С. Рабочие вещества холодильных машин. М.: Пищепромиздат, 1952. С. 228.

[23] Бадилькес И.С. Рабочие вещества и процессы холодильных машин. М.: Госторгиздат, 1962. С. 30–184.

[24] Бошнякович Ф. Техническая термодинамика, Ч. II. М.; Л.: Госэнергонздат, 1956. С. 20–42.

[25] Смирнов А.Ю., Гусев В.Е., Сулаберидзе Г.А., Невиница В.А., Фомиченко П.А. Анализ влияния ограничений по изотопам ²³², ²³⁴, ²³⁶U в товарном НОУ на выбор способов обогащения регенерата урана в каскадах центрифуг // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов, 2020. № 1. С. 87–96.

[26] Галка Г.А., Стрельцов А.В. Теоретический обзор авторефрижераторов и режимов их работы // Молодой ученый, 2018. № 31 (217). С. 7–11.

[27] Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1971. 22 с.

- [28] Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. Авт. Свидетельство № 124063 от 24.08.1969. С. 4–8.
- [29] Fukuda M., Tsuchiya F., Ryokai K., Mochizuki M., Mashiko K. Development of artificial permafrost storage using heat pipes // The 3rd International Heat Pipe Symposium. Tsukuba, 1988, pp. 285–289.
- [30] Шульц А.Н. Мониторинг низкопотенциальных тепловых ресурсов и решение проблем их утилизации // Труды III РНКТ. М.: Изд-во МЭИ, 2002. С. 131–133.

Сведения об авторе

Шульц Александр Николаевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Высшая математика и физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), shults@mail.ac.ru

Поступила в редакцию 18.07.2023.

Одобрено после рецензирования 13.09.2023.

Принята к публикации 20.10.2023.

VORTEX HEAT EXCHANGER FOR HEAT AND COLD GENERATION

A.N. Shults

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

shultslek@mail.ru

The possibility of creating a refrigerating machine based on the evaporation-condensation cycle, which uses the physical processes of an absorption refrigerating machine and a heat pipe, is considered. The experience gained in the field of heat and mass transfer research when starting TT from the frozen state of the coolant is used in the work. Vortex structures in the steam channel are revealed, creating real boundaries within which the formation of a non-stationary vapor-droplet flow occurs. The flow of wet steam occurs under the influence of vortex structures that vary in intensity and direction of rotation. The design scheme of the hydrodynamic flow pattern should use a two-phase flow model and real boundaries created by vortex structures.

Keywords: evaporation, condensation, refrigerator, heat pipe, absorption, vortex

Suggested citation: Shults A.N. *Vikhreвой teploobmennik dlya proizvodstva tepla i kholoda* [Vortex heat exchanger for heat and cold generation]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 6, pp. 189–198. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-189-198

References

- [1] Vasil'ev L.L. *Teplovye trubyy dlya nagreva i okhlazhdeniya grunta* [Heat pipes for heating and cooling the soil]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* [Engineering and Physical J.], 1987, t. 52, no. 4, pp. 676–687.
- [2] Patent № 2031347 RF, 6F 28 D 1502. *Teplovaya truba* [Heat pipe]. V.N. Kharchenko et al. RF no. 4949383 06, publ. 20.03.95, bull. no. 8, 5 p.
- [3] Afanasev A.S., Polushkin V.M., Sobolev V.A., Suslov V.M., Kotov Y.T., Znamenskaya T.D. *Vliyaniye vneshney vozdeystviyushchey vibratsii na mikroelektromekhanicheskie sistemy-akselerometriy* [Influence of external vibration on microelectromechanical converters of linear acceleration]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 5, pp. 138–143. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-5-138-143
- [4] Van Oyen X., Khogendorff K.Dzh. *Raschety techeniya para v ploskoy teplovoy trube* [Calculations of steam flow in a flat heat pipe]. *Raketnaya tekhnika i kosmonavtika* [Rocket technology and cosmonautics], 1979, v. 17, no. 11, pp. 122–132.
- [5] Shifrin K.S., Golikov V.I. *Opreделение спектра капел' методом малыkh uglov* [Determination of the spectrum of droplets by the small angle method]. *Trudy 6-y mezhvedomstvennoy konferentsii po issledovaniyu oblakov, osadkov i grozovogo elektrichestva AN SSSR* [Proceedings of the 6th Interdepartmental Conference on the Cloud Research, Precipitation and Thunderstorm Electricity of the USSR Academy of Sciences], 1960, pp. 2–33.
- [6] Hannes H. *Inferometrische Messung der thermischen Energie von elektrischen Funken*. *Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens A*, 1963, no. 29, pp. 169–175.
- [7] Varapaev V.N., Yagodkin V.I. *Ob ustoychivosti techeniya v kanalakh s pronitsaemymi stenkami* [On the stability of flow in channels with permeable walls]. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Mechanics of liquid and gas], 1969, no. 5, pp. 91–95.
- [8] Varapaev V.N. *Techeniye вязкой жидкости в начальной части плоского канала с пористыми стенками* [Flow of a viscous fluid in the initial section of a flat channel with porous walls]. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Mechanics of liquid and gas], 1969, no. 4, pp. 179–181.
- [9] Abramovich G.N. *Prikladnaya gazovaya dinamika* [Applied gas dynamics]. Moscow: Nauka, 1969, pp. 31–32.
- [10] Shul'ts A.N. *Opreделение ental'pii neravnovesnogo parovogo potoka* [Determination of the enthalpy of a nonequilibrium steam flow]. *Trudy 4-y Ros. nats. konf. po teploobmenu* [Proceedings of the 4th Ros. national conf. on heat exchange]. Moscow, October 23–27, 2006. Moscow: MPEI, 2006, t. 5, pp. 329–332.

- [11] Pavlov P.A. *Dinamika vskipaniya sil'no peregretykh zhidkostey* [Dynamics of boiling of highly superheated liquids]. Ed. V.P. Skripova. Sverdlovsk: USSR Academy of Sciences, 1988, 243 p.
- [12] Frenkel' Y.I. *Kineticheskaya teoriya zhidkosti* [Kinetic theory of liquid]. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1945, pp. 4–29.
- [13] Khufshmidt V., Burk E., Kola G., Khofman G. *Vliyaniye kasatel'nykh napryazheniy, vznikayushchikh pri dvizhenii para, na laminarnyy potok zhidkosti v kapillyarakh teplovykh trub* [The influence of tangential stresses arising during the movement of steam on the laminar flow of liquid in the capillaries of heat pipes]. *Teplovye trubyy* [Heat Pipes]. Moscow: Mir, 1972, 203 p.
- [14] Voropaev V.N., Yagodkin V.I. *Ob ustoychivosti nekotorykh neparallelnykh techeniy vyazkoy neszhimaemoy zhidkosti v kanale* [On the stability of some non-parallel flows of a viscous incompressible fluid in a channel]. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Mechanics of Liquid and Gas], 1970, no. 4, pp. 125–129.
- [15] Deych M.E., Filippov G.A. *Gazodinamika dvukhfaznykh sred* [Gas dynamics of two-phase media]. Moscow: Energy, 1968, 423 p.
- [16] Pozhilov A.A., Zaytsev D.K., Smirnov E.M., Smirnovskiy A.A. *Chislennoe modelirovaniye teplomassoperenosa v trekhmernoy modeli isparitelya konturnoy teplovoy trubyy* [Numerical modeling of heat and mass transfer in a three-dimensional model of a loop heat pipe evaporator]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPBGPU. Fiziko-matematicheskie nauki* [Scientific and Technical Journal of St. Petersburg State Polytechnic University. Physics and Mathematics], 2017, v. 10, no. 3, pp. 52–63. DOI: 10.18721/JPM/10305
- [17] Ponapan R., Leland J.E. Rotating heat pipe for cooling of rotor in advanced generators. 6th Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference, 1994, no. 6, pp. 1–10. DOI:10.2514/6.1994-2033
- [18] Baranenko A.V., Bukharin N.N., Pekarev V.I., Sakun I.A. *Kholodil'nye mashiny* [Refrigerating machines]. Ed. L.S. Timofeevsky. St. Petersburg: Politekhnik, 1997, 992 p.
- [19] Solov'ev G. *Nasha tsentrifuga nuzhna amerikantsam* [Americans need our centrifuge]. *Atomnaya energiya* [Atomic Energy], June 11, 2011. Available at: <https://www.atomic-energy.ru/interviews/2015/05/06/23342> (accessed 02.10.2022).
- [20] Masterov V.B., Glebov A.A., Krasnoborod'ko A.B., Bateev S.V. *Kontseptual'nyy podkhod k analizu riska ispol'zovaniya yadernykh materialov v neenergeticheskikh tselyakh* [Conceptual approach to analyzing the risk of using nuclear materials for non-energy purposes]. *Effektivnoe antikrizisnoe upravlenie* [Effective anti-crisis management], 2012, no. 5 (74), p. 92
- [21] Satkevich A.A. *Absorbtsionnaya kholodil'naya ustanovka* [Absorption refrigeration unit]. Leningrad: Transpechat, 1930, 112 p.
- [22] Badyl'kes I.S. *Rabochie veshchestva kholodil'nykh mashin* [Working substances of refrigeration machines]. Moscow: Pishchepromizdat, 1952, p. 228.
- [23] Badyl'kes I.S. *Rabochie veshchestva i protsessy kholodil'nykh mashin* [Working substances and processes of refrigeration machines]. Moscow: Gostorgizdat, 1962, pp. 30–184.
- [24] Boshnyakovich F. *Tekhnicheskaya termodinamika* [Technical thermodynamics], Part II. Moscow–Leningrad: Gosenergonzdat, 1956, pp. 20–42.
- [25] Smirnov A.Yu., Gusev V.E., Sulaberidze G.A., Nevinita V.A., Fomichenko P.A. *Analiz vliyaniya ogranicheniy po izotopam 232, 234, 236U v tovarnom NOU na vybor sposobov obogashcheniya regenerata urana v kaskadakh tsentrifug* [Analysis of the influence of restrictions on 232, 234, 236U isotopes in commercial LEU on the choice of methods for enriching uranium reclaim in centrifuge cascades]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Fizika yadernykh reaktorov* [Questions of Atomic Science and Technology. Series: Physics of Nuclear Reactors], 2020, no. 1, pp. 87–96.
- [26] Galka G.A., Strel'tsov A.V. *Teoreticheskiy obzor avtorefrizheratorov i rezhimov ikh raboty* [Theoretical review of refrigerated trucks and their operating modes]. *Molodoy uchenyy* [Young scientist], 2018, no. 31 (217), pp. 7–11.
- [27] Kasatkin A.G. *Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [Basic processes and apparatuses of chemical technology]. Moscow: Chemistry, 1971, 22 p.
- [28] Kasatkin A.G. *Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [Basic processes and apparatuses of chemical technology]. Auto. Certificate no. 124063 dated 08/24/1969, pp. 4–8.
- [29] Fukuda M., Tsuchiya F., Ryokai K., Mochizuki M., Mashiko K. Development of artificial permafrost storage using heat pipes. The 3rd International Heat Pipe Symposium. Tsukuba, 1988, pp. 285–289.
- [30] Shults A.N. *Monitoring nizko-potentsial'nykh teplovykh resursov i reshenie problem ikh utilizatsii* [Monitoring of low-potential thermal resources and solving problems of their utilization]. *Tudy III RNKT* [Tudy III RNKT]. Moscow: Publishing house MPEI, 2002, pp. 131–133.

Author's information

Shul'ts Aleksandr Nikolaevich — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), shultsalek@mail.ru

Received 18.07.2023.

Approved after review 13.09.2023.

Accepted for publication 20.10.2023.

РЕГИСТРАЦИЯ, ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИИ С ЭЛЕКТРОСЕЙСМОКАРДИОБЛОКА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ РЕСПИРАТОРНЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

М.Е. Рулев^{1,2✉}, В.М. Ачильдиев^{1,2}

¹ОАО «Научно-производственное объединение ГЕОФИЗИКА-НВ» (НПО ГЕОФИЗИКА-НВ), Россия, 107076, Москва, ул. Матросская Тишина, д. 23, стр. 2

²ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

maxxim98@yandex.ru

Изложена методика регистрации кардиосигналов и респираторных циклов по сигналам электросейсмокардиоблока. Установлено, что все типы сигналов, регистрируемых электросейсмокардиоблоком, несут в себе информацию о дыхательном процессе человека. Выбраны информационные каналы электросейсмокардиоблока, которые необходимы для оценки функционального состояния по биофизическим сигналам. Выполнено сравнение характеристик дыхательных огибающих, полученных по разным биофизическим сигналам. Предложены функциональные соотношения для определения параметров респираторных циклов. Вычислены и проанализированы знаки приращений характерных параметров дыхания. Представлены табличные результаты оценки вариабельности респираторных циклов по показателям коэффициентов вариации. Выявлено, что приращения таких параметров дыхания, как периоды, продолжительности вдохов и площади, заключенные под кривыми дыхательных циклов, совпадают в наибольшем числе случаев по всем типам сигналов, при этом величины таких параметров обладают наибольшими показателями вариабельности.

Ключевые слова: электрокардиография, сейсмокардиография, гирокардиография, электросейсмокардиоблок, респираторный цикл, вариабельность

Ссылка для цитирования: Рулев М.Е., Ачильдиев В.М. Регистрация, обработка и анализ информации с электросейсмокардиоблока для диагностики респираторных заболеваний // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 6. С. 199–207. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-199-207

Из известных биофизических сигналов человека наибольшее внимание для исследований и медицинской диагностики получили электрокардиографические импульсы. На основе их анализа в результате многолетних исследований, проведенных профессором В.М. Успенским, создана теория информационного анализа электрокардиосигналов, благодаря которой в медицинской практике появилась возможность обнаружения неинвазивным способом десятков неинфекционных заболеваний внутренних органов человека, в том числе на начальных этапах их развития [1]. Позднее появились работы [2–8], в которых указаны возможность и необходимость регистрации и анализа таких механических колебаний грудной клетки, как сейсмокардиографический и гирокардиографический импульсы.

В соответствии с теорией информационной функции сердца [1] диагностика заболеваний по электрокардиосигналам состоит в определении характерных параметров электрокардиограммы (ЭКГ) в каждом цикле, таких как амплитуда R_n , период T_n и фазовый угол α_n . После их нахождения символами А, В, С, D, Е и F шифруются варианты приращений характерных параметров

в зависимости от сочетаний приращений ΔR_n , ΔT_n , $\Delta \alpha_n$. Наконец, соединяя последовательность полученных символов в трехчленные комбинации, на основе совпадений получившихся закодированных вариантов с имеющимися заболеваниями, для каждого из которых существуют эталонные кодовые образы норм и отклонений, составляется заключение об имеющихся заболеваниях и степени их проявления на момент исследования.

Схожий метод обработки применим для диагностики по сейсмокардиограмме (СКГ) и гирокардиограмме (ГКГ). Эти кардиоимпульсы по виду и форме схожи с ЭКГ и, по всей видимости, также несут в себе информационную составляющую [2, 3]. Благодаря этому допущению появилась возможность для совместной регистрации этих трех типов кардиосигналов. Для этого разработан электросейсмокардиоблок (ЭСКБ), выводящий информацию по девяти каналам: три отведения ЭКГ, располагаемых по схеме Эйнтховена, и по три проекции вектора линейного ускорения (проекции СКГ) и угловой скорости (проекции ГКГ) на оси x , y и z приборной системы координат. Для обеспечения оптимально-рационального подхода предложено обрабатывать по одному кардиосигналу каждого типа, а именно

ЭКГ₂ (второе отведение ЭКГ), СКГ_z (проекция СКГ на ось z) и ГКГ_y (проекция ГКГ на ось y), а в качестве исследуемых параметров использовать нормированные амплитуды $R_{\text{норм}}$, периоды $T_{\text{норм}}$ и площади $S_{\text{норм}}$ кардиоциклов, а также их приращение [9, 10]. При этом допустимо использование проекции ГКГ на ось x наравне с проекцией на ось y по причине схожести гирокардиоимпульсов по этим проекциям [11].

Помимо кардиосигналов возможно идентифицировать дыхательные, или респираторные, циклы [12]. Поскольку известно, что частота сердечных сокращений коррелирует с частотой дыхания, то вероятно, что та или иная вариабельность дыхания свидетельствует о наличии определенного заболевания дыхательной системы [13]. Отсюда следует, что в отличие от диагностики по кардиосигналам, которая выявляет только неинфекционные заболевания внутренних органов, разработка метода исследования и анализа респираторных циклов способствует расширению теории В.М. Успенского в части диагностики респираторных и вирусных инфекций.

Цель работы

Цель работы — разработка способов идентификации респираторных циклов для неинвазивной диагностики инфекционных заболеваний и заболеваний органов дыхания человека посредством обработки таких биофизических сигналов, как ЭКГ, СКГ и ГКГ.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являются биофизические сигналы, идентифицируемые ЭСКБ [11, 14]. ЭКГ регистрирует электрокардиоблок (ЭКБ) высокого разрешения [15]. СКГ и ГКГ фиксирует закрепляемый на грудной клетке сейсмокардиоблок (СКБ), в котором установлены трехосные блоки МЭМС-акселерометров и гироскопов [4, 16, 17]. ЭКБ высокого разрешения и СКБ, входящие в состав ЭСКБ, обеспечивают синхронную передачу напряжения (V), линейного ускорения (g) и угловой скорости (град/с) через микроконтроллер ЭСКБ с последующим выводом информации через USB-порт на персональный компьютер через специализированное программное обеспечение, реализованное в среде Delphi [18].

Кардиографические импульсы представляют собой стационарные эргодические случайные процессы, у которых вероятностные характеристики (математическое ожидание, дисперсия и т. д.) существенно не изменяются, т. е. их нужно оценить по одной реализации (по одному опыту) [19]. В соответствии с этим положением определена автокорреляционная функция для стационарного случайного процесса $X(t)$:

$$R_x(t) = M[\dot{X}(t), \dot{X}(t + \tau)],$$

где $\dot{X}(t)$ — центрированный случайный процесс, τ — временной сдвиг.

Таким образом, автокорреляционная функция отражает взаимосвязь между функцией (сигналом) и ее сдвинутыми копиями на значения τ . Следовательно, если кардиосигнал содержит дыхательную составляющую, то на графике автокорреляционной функции будут заметны колебательные процессы.

Для трех отведений ЭКГ и для трех проекций СКГ и ГКГ нормированные автокорреляционные функции построены на рис. 1. Установлено, что респираторные циклы сигналов проявляются в виде гармонических процессов в сигнале СКГ в проекциях на оси x и y (см. рис. 1, б), а в сигнале ГКГ — в проекциях на оси x и z (см. рис. 1, в). В то же время гармонические процессы в автокорреляционной функции сигнала СКГ в проекции на ось z еле различимы, как и в случае с проекцией ГКГ на ось y . При этом сигналы в проекции ГКГ на ось z характеризуются малыми амплитудами и высокой степенью зашумленности.

Одновременно с этим из рис. 1, а следует, что в автокорреляционной функции ЭКГ-сигнала такие колебания отсутствуют. Это объясняется тем, что при должном креплении электродов ЭКГ не отражает механические воздействия. Однако в некоторые фиксированные моменты дыхания можно проследить в области QRS-комплекса ЭКГ — как по R -зубцам, соответствующим локальным максимумам, так и по S -зубцам, соответствующим локальным минимумам [20]. Этот факт обусловлен попеременными разрядами нейронов дыхательного центра в продолговатом мозге [1, 21]. Действительно, на рис. 2 в сигнале ЭКГ по второму отведению отчетливо прослеживаются дыхательные волны в виде двух огибающих, образованных по экстремумам каждого электрокардиоцикла. Аналогичным образом выглядят огибающие по другим отведениям. Тем не менее следует иметь в виду, что точные значения кривой дыхания можно найти по изменениям R - или S -пиков не более 2 раз в секунду.

Дыхательный процесс на сейсмо- и гирокардиограмме отображается непосредственно в виде изменения диапазона измеряемых значений, что проиллюстрировано на рис. 3. Кривая красного цвета построена методом скользящего среднего с окном осреднения, равным 1 с.

При исследовании респираторных циклов рационально использовать те проекции или отведения, где дыхание регистрируется с наибольшей амплитудой. Однако для обеспечения максимальной пропускной способности USB-интерфейса при передаче данных от ЭСКБ на персональный

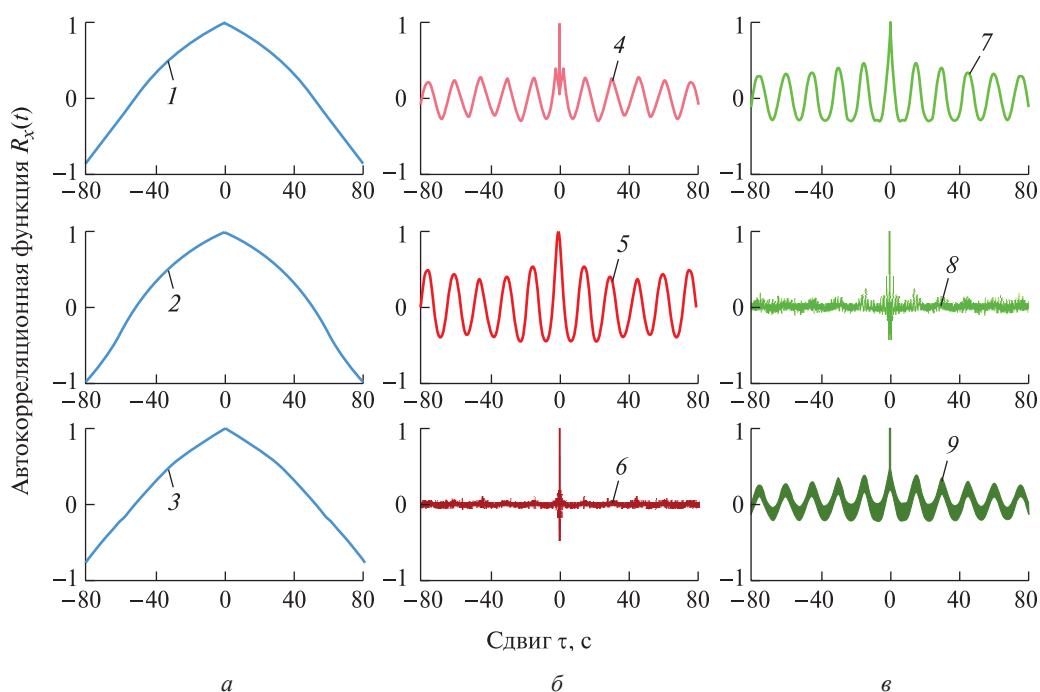


Рис. 1. Автокорреляционные функции электро- (а), сейсмо- (б) и гирокардиограмм (в): 1 — первое отведение ЭКГ; 2 — второе отведение ЭКГ; 3 — третье отведение ЭКГ; 4 — СКГ, регистрируемая вдоль оси x; 5 — СКГ, регистрируемая вдоль оси y; 6 — СКГ, регистрируемая вдоль оси z; 7 — ГКГ, регистрируемая вдоль оси x; 8 — ГКГ, регистрируемая вдоль оси y; 9 — ГКГ, регистрируемая вдоль оси z

Fig. 1. Autocorrelation functions of electro- (a), seismo- (b) and gyrocardiograms (v): 1 — first ECG lead; 2 — second ECG lead; 3 — third ECG lead; 4 — SCG recorded along the x-axis; 5 — SCG recorded along the y-axis; 6 — SCG recorded along the z-axis; 7 — GCG recorded along the x-axis; 8 — GCG recorded along the y-axis; 9 — GCG recorded along the z-axis

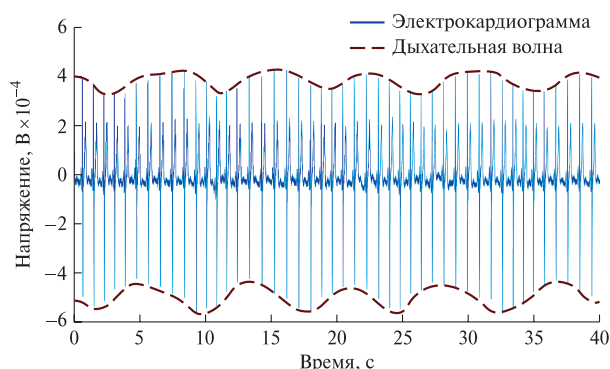


Рис. 2. Фрагмент сигнала ЭКГ по второму отведению
Fig. 2. ECG signal fragment on the second lead

компьютер желательно использовать минимальное число отведений и проекций. Таким образом, учитывая выбранные отведения и проекции для анализа кардиосигналов, а также полученные автокорреляционные функции и проведенный анализ дыхательного процесса, для исследований биофизических сигналов человека оправдано использование только четырех из девяти каналов ЭСКБ: второго отведения ЭКГ, двух проекций СКГ (на оси y и z), а также проекции ГКГ на ось x.

В настоящей работе далее представлены результаты испытаний и исследований, которые проводились на условно здоровых пациентах. Испытуемые находились в спокойном расслабленном лежачем положении. Регистрация кардиосигналов для каждого из них выполнялась в течение 15 мин.

Результаты и обсуждение

По аналогии с кардиоциклами для оценки variability дыхания предложено исследовать следующие параметры:

– период (временной промежуток между соседними локальными минимумами)

$$T_{\text{дых}}^{\text{норм}}(j) = t(\min[y_{\text{дых}}(j+1)]) - t(\min[y_{\text{дых}}(j)]);$$

– амплитуда, или размах (разница между максимальным и минимальным значениями внутри дыхательного цикла)

$$R_{\text{дых}}^{\text{норм}}(j) = \frac{1}{D_R} (\max[y_{\text{дых}}(j)] - \min[y_{\text{дых}}(j)]);$$

– продолжительность вдоха

$$T_{\text{вд}}^{\text{норм}}(j) = t(\max[y_{\text{дых}}(j)]) - t(\min[y_{\text{дых}}(j)]);$$

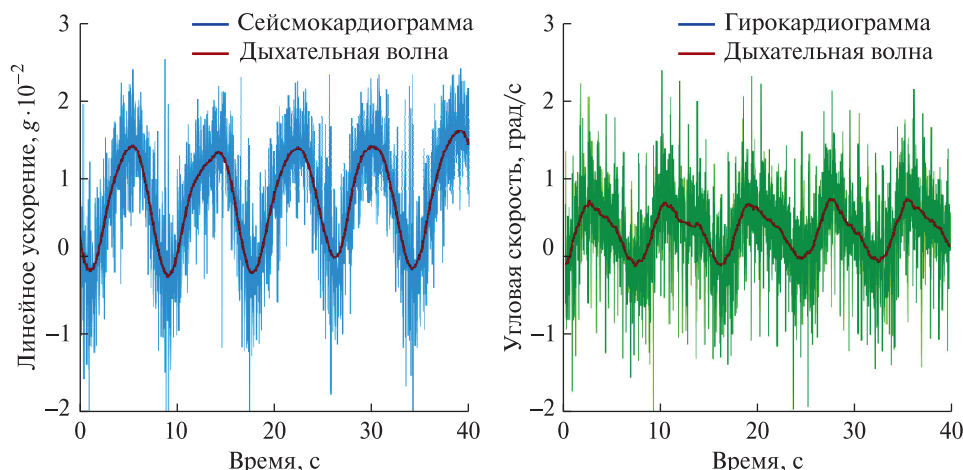


Рис. 3. Выделение дыхательных волн из сигналов СКГ (проекция на ось y) и ГКГ (проекция на ось x)

Fig. 3. Separation of respiratory waves from the ECG (projection on the y -axis) and GKG (projection on the x -axis) signals

– продолжительность выдоха

$$T_{\text{выд}}^{\text{норм}}(j) = t(\min[y_{\text{дых}}(j+1)]) - t(\max[y_{\text{дых}}(j)]);$$

– площадь, заключенная под кривой дыхательного цикла

$$S_{\text{дых}}^{\text{норм}}(j) = \sum_{i=1}^{k-1} \frac{1}{D_R} \left(\frac{y_{\text{дых}}(i) + y_{\text{дых}}(i+1)}{2} - \min[y_{\text{дых}}(j)] \right),$$

где j — номер кардиоцикла;

D_R — номинальный диапазон изменений ЭКГ, СКГ и ГКГ, определенный эмпирически ($D_R^{\text{ЭКГ}} = 2,5$ мВ, $D_R^{\text{СКГ}} = 0,075$ г, $D_R^{\text{ГКГ}} = 5$ град/с);

$y_{\text{дых}}$ — дыхательная огибающая;

$t(\max[y_{\text{дых}}(j)])$ — время, в которое кривая $y_{\text{дых}}(j)$ достигает максимума;

$t(\min[y_{\text{дых}}(j)])$ — время, в которое кривая $y_{\text{дых}}(j)$ достигает минимума;

k — количество отсчетов в j -м дыхательном цикле.

Значения $T_{\text{дых}}^{\text{норм}}$, $T_{\text{вд}}^{\text{норм}}$ и $T_{\text{выд}}^{\text{норм}}$ представляются в безразмерной форме из соображения, что одной миллисекунде соответствует один отсчет [22].

Указанные параметры в общем виде проиллюстрированы на рис. 4.

В соответствии с теорией, изложенной в работе [1] после вычисления приращений параметров ЭКГ-сигнала осуществляется формирование комбинаций кодовых последовательностей, что является важной задачей, решение которой позволит судить об имеющихся заболеваниях. Подобным образом следует обходиться с СКГ и ГКГ [23]. Поэтому для верификации респираторных циклов, выбора их параметров и типа исходного кардиосигнала, по которому строится дыхательная огиба-

ющая, выполнено сравнение знаков приращений параметров для пар кардиосигналов ЭКГ–СКГ, СКГ–ГКГ и ЭКГ–ГКГ. В идеальном случае (при отсутствии методических погрешностей и минимальных значениях погрешностей в сигналах ЭСКБ) показатели совпадений приращений параметров дыхания для всех трех пар кардиосигналов должны совпадать и быть максимальными.

Для расчета приращений параметров дыхания с помощью программно-математического обеспечения, реализованного в среде MATLAB [24], предварительно идентифицированы 100 респираторных циклов по информации с ЭСКБ. Графическое отображение результатов обработки дано на рис. 5.

Приращение каждого параметра вычислено по формуле

$$\Delta p(j) = p(j+1) - p(j),$$

где p — численное значение параметра в j -м дыхательном цикле.

Анализируя результаты, представленные на рис. 5, можно сделать вывод о том, что знаки приращений параметров $T_{\text{дых}}^{\text{норм}}$ и $T_{\text{вд}}^{\text{норм}}$ совпадают в максимальном количестве случаев (80...95%), поэтому определение этих параметров дыхательного процесса можно считать наиболее достоверным. В то же время среди других параметров дыхания наибольшее процентное совпадение знаков приращений оказалось у параметра $S_{\text{дых}}^{\text{норм}}$ (65...85%). При этом наименьшие значения получены у параметров $R_{\text{дых}}^{\text{норм}}$ и $T_{\text{выд}}^{\text{норм}}$ (60...70%), следовательно, использовать их в качестве показателей вариабельности дыхания не следует.

Также следует отметить, что по результатам сравнения ЭКГ–СКГ параметры $T_{\text{вд}}^{\text{норм}}$, $E_{\text{дых}}^{\text{норм}}$ и $S_{\text{дых}}^{\text{норм}}$ обладают самыми высокими показателями совпадений знаков приращений на уровне 85...95%, нежели у пар СКГ–ГКГ и ЭКГ–ГКГ.

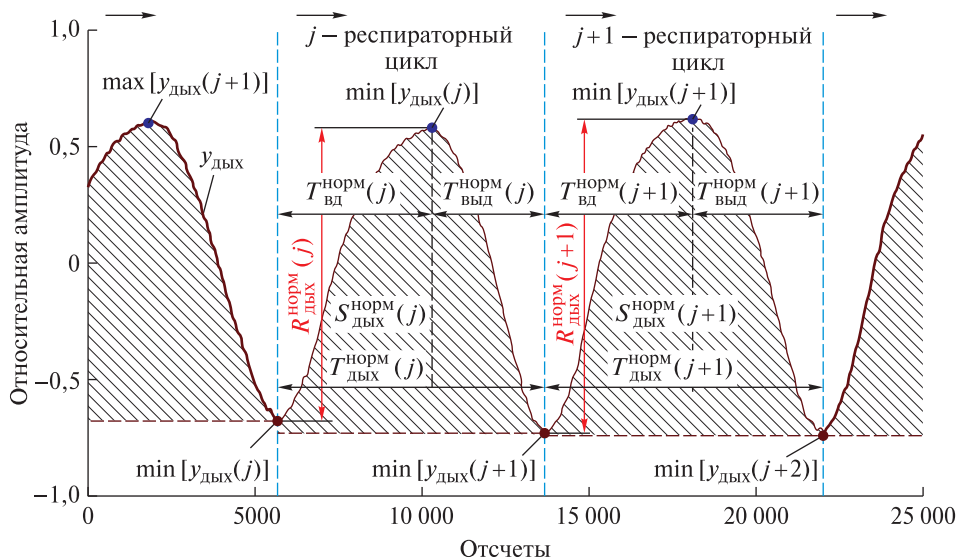


Рис. 4. Исследуемые параметры респираторных циклов
 Fig. 4. Studied parameters of respiratory cycles

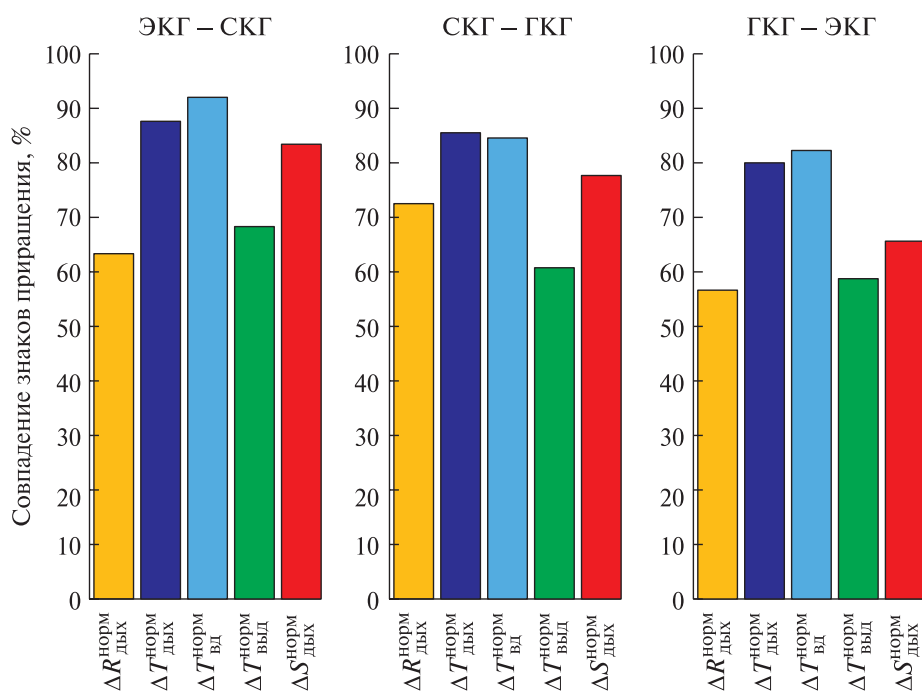


Рис. 5. Совпадение знаков приращений параметров респираторных циклов
 Fig. 5. Signs coincidence of respiratory cycle parameters increments

Вариабельность может быть оценена [25] по выражению

$$CV(p) = \frac{\sigma(p)}{M(p)},$$

где $CV(p)$ — коэффициент вариации;
 $\sigma(p)$ и $M(p)$ — среднеквадратическое отклонение и математическое ожидание параметра p соответственно.

Результаты подсчета CV отображены в таблице. Из данных, приведенных в таблице, видно, что

площадь дыхательного цикла $S_{дых}^{норм}$ и продолжительность выдоха $T_{выд}^{норм}$ имеют наибольшие значения коэффициента вариации. Одновременно с этим все параметры, кроме размаха $R_{дых}^{норм}$, обладают максимальными коэффициентами вариации по сигналу ЭКГ. Однако такие высокие показатели вариабельности, вероятно, вызваны неточностью определения идентифицированных параметров, о чем свидетельствуют ранее рассчитанные значения их достоверности.

Оценка вариабельности респираторных циклов Respiratory cycle variability assessment

Параметры p		$R_{\text{дых}}^{\text{норм}}$	$T_{\text{дых}}^{\text{норм}}$	$T_{\text{вд}}^{\text{норм}}$	$T_{\text{выд}}^{\text{норм}}$	$S_{\text{дых}}^{\text{норм}}$
ЭКГ	$M(p)$	$7,02 \cdot 10^{-1}$	$8,06 \cdot 10^3$	$4,79 \cdot 10^3$	$3,27 \cdot 10^3$	$2,77 \cdot 10^3$
	$\sigma(p)$	$9,87 \cdot 10^{-2}$	$1,34 \cdot 10^3$	$1,16 \cdot 10^3$	$1,06 \cdot 10^3$	$6,86 \cdot 10^2$
	$CV(p), \%$	14,06	16,62	24,31	32,34	24,78
СКГ	$M(p)$	$6,13 \cdot 10^{-1}$	$8,16 \cdot 10^3$	$4,33 \cdot 10^3$	$3,85 \cdot 10^3$	$2,84 \cdot 10^3$
	$\sigma(p)$	$1,17 \cdot 10^{-1}$	$1,08 \cdot 10^3$	$6,71 \cdot 10^2$	$8,95 \cdot 10^2$	$6,36 \cdot 10^2$
	$CV(p), \%$	19,05	13,22	15,51	23,22	22,37
ГКГ	$M(p)$	$6,53 \cdot 10^{-1}$	$8,20 \cdot 10^3$	$4,87 \cdot 10^3$	$3,33 \cdot 10^3$	$2,77 \cdot 10^3$
	$\sigma(p)$	$1,18 \cdot 10^{-1}$	$1,16 \cdot 10^3$	$8,36 \cdot 10^2$	$9,07 \cdot 10^2$	$6,09 \cdot 10^2$
	$CV(p), \%$	18,08	14,09	17,16	27,22	21,98

Таким образом, совокупный анализ полученных результатов позволяет утверждать, что для оценки вариабельности дыхания рационально использовать общее время дыхания, продолжительность вдоха, а также площадь респираторных циклов. Наиболее пригодными для их идентификации являются ЭКГ- и СКГ- импульсы.

Выводы

Рассмотренные биофизические сигналы содержат информацию о дыхательном процессе человека, который может быть зарегистрирован ЭСКБ без применения дополнительного оборудования. Одним из способов идентификации респираторных циклов является обработка ЭКГ-сигнала, заключающаяся в построении огибающей кривой по периодически изменяющимся R - или S -зубцам методом интерполяции. Другой вариант построения дыхательных циклов заключается в обработке СКГ или ГКГ методом скользящего среднего. При любом варианте обработки респираторных циклов и кардиоимпульсов необходимо и достаточно получать информацию по четырем каналам ЭСКБ: первое отведение ЭКГ, проекции СКГ на оси y и z и проекция ГКГ на ось x . Расчет характерных параметров дыхания позволил найти и сопоставить их приращения, а также выполнить оценку вариабельности. Установлено, что диагностику заболеваний органов дыхания и респираторных инфекций есть возможность осуществить по ЭКГ или СКГ на основе вариабельности таких параметров, как общая продолжительность дыхательных циклов $T_{\text{дых}}^{\text{норм}}$, продолжительность вдохов $T_{\text{вд}}^{\text{норм}}$ и площадь респираторных циклов $S_{\text{дых}}^{\text{норм}}$.

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] Paukkunen M. Seismocardiography: Practical implementation and feasibility // Aalto University publication series Doctoral Dissertations, 2014, 46 p.

[3] Lehtonen E., Saraste A., Tuominen J., Koskinen J., Teräs M., Airaksinen J., Pänkäälä M., Koivisto T. Gyrocardiography: A New Noninvasive Monitoring Method for the Assessment of Cardiac Mechanics and the Estimation of Hemodynamic Variables // Scientific Reports, 2017, v. 7(1), pp. 1–11. DOI: 10.1038/s41598-017-07248-y

[4] Achil'diyev V.M., Bedro N.A., Soldatenkov V.A., Yevseyeva YU.N., Gruzevich YU.K., Levkovich A.D., Basarab M.A., Konnova N.S. Cardioseismometer unit based on micromechanical sensors // 25th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, 28–30 May, 2018, Saint Petersburg, Russia, pp. 272–281. DOI: 10.23919/ICINS.2018.8405892

[5] D'Mello Y., Skoric J., Xu S., Roche P.J.R., Plant D.V., Lortie M., Gagnon S. Real-time cardiac beat detection and heart rate monitoring from combined seismocardiography and gyrocardiography // Sensors, 2019, v. 19(16), pp. 1–19. DOI: 10.3390/s19163472

[6] Sיעіński S., Kostka P.S., Tkacz E.J. Gyrocardiography: A review of the definition, history, waveform description, and applications // Sensors, 2020, v. 20(22), pp. 1–30. DOI: 10.3390/s20226675

[7] Sיעіński S., Kostka P.S., Tkacz E.J. Heart rate variability analysis on electrocardiograms, seismocardiograms and gyrocardiograms on healthy volunteers // Sensors, 2020, v. 20(16), pp. 1–16. DOI: 10.3390/s20164522

[8] Achil'diyev V.M., Bedro N.A., Komarova M.N., Rulev M.E., Yevseyeva YU.N., Uspenckiy V.M., Gruzevich YU.K. Gyrocardiography unit for non-invasive human diseases diagnosis // 27th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, 25–27 May, 2020, Saint Petersburg, Russia, pp. 1–7. DOI: 10.23919/ICINS43215.2020.9133891


[9] Ачильдиев В.М., Грузевич Ю.К., Евсеева Ю.Н., Балдин А.В., Спасенов А.Ю., Кучеров К.В., Рулев М.Е., Шабаяв Р.Г., Бедро Н.А. Способ неинвазивного определения биофизических сигналов. Пат. № 2761741 РФ, заявитель и патентообладатель ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ», ООО «АРК Системс», 2021. Бюл. № 35.

[10] 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.

[11] Achil'diyev V.M., Gruzevich YU.K., Soldatenkov V.A., Bedro N.A., Evseeva YU.N., Komarova M.N., Rulev M.E., Uspensky V.M. Electroiseismogyrocardiography

- system for human diseases screening // *Nanoindustry*, 2020, no. S5–2, v. 13, pp. 583–593.
- [12] Klum M., Urban M., Tigges T., Pielmus A., Feldheiser A., Schmitt T., Orglmeister R. Wearable Cardiorespiratory Monitoring Employing a Multimodal Digital Patch Stethoscope: Estimation of ECG, PEP, LVET and Respiration Using a 55 mm Single-Lead ECG and Phonocardiogram // *Sensors*, 2020, v. 20(27), pp. 1–21. DOI: 10.3390/s20072033
- [13] Sayers B.M. Analysis of heart rate variability // *Ergonomics*, 1973, v. 16(1), pp. 17–32. DOI: 10.1080/00140137308924479
- [14] Рулев М.Е., Ачильдиев В.М., Грузевич Ю.К., Бедро Н.А. Первичная обработка биофизических сигналов электросейсмокардиоблока // Сб. тр. XXIX Санкт-Петербургской междунар. конф. по интегрированным навигационным системам, Санкт-Петербург, 30 мая–01 июня 2022 г. СПб.: Изд-во Концерн «Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор», 2022. С. 26–29.
- [15] Грузевич Ю.К., Успенский В.М. Ачильдиев В.М. Электрокардиоблока высокого разрешения для скрининг-индикации заболеваний внутренних органов человека // Информационные и телекоммуникационные технологии, 2019. № 40. С. 39–46.
- [16] 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 междунар. конф. по интегрированным навигационным системам, Санкт-Петербург, 27–29 мая 2019 г. СПб.: Изд-во Концерн «Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор», 2019. С. 233–236.
- [17] 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 сейсмокардиоцикла. Пат. № 2679296 РФ, заявитель и патентообладатель ОАО «НПО Геофизика-НВ», 2019. Бюл. № 4.
- [18] Delphi – Embarcadero Website. URL: <https://www.embarcadero.com/ru/products/delphi> (дата обращения 02.11.2022).
- [19] Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 1989. 540 с.
- [20] Paukkunen M, Linnavuo M. Sepponen R. A Portable Measurement System for the Superior-Inferior Axis of the Seismocardiogram // *J. of bioengineering and biomedical science*, 2013, pp. 1–4. DOI: 10.4172/2155-9538.1000123
- [21] Санюкевич Л.И. Краткий словарь физиологических терминов. Минск: Вышэйшая школа, 1992. 206 с.
- [22] Рулев М.Е., Ачильдиев В.М. Регистрация и методы обработки биофизических сигналов для неинвазивной диагностики заболеваний человека // Ежегодная нац. науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана по итогам научно-исследовательских работ за 2021 г., Мытищи, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, 31 января–2 февраля, 2022 г. / под ред. В.Г. Санаева. Красноярск, 2022. С. 150–152.
- [23] Achil'diyev V.M., Bedro N.A., Gruzevich YU.K., Evseeva YU.N., Komarova M.N., Rulev M.E., Soldatenkov V.A., Uspensky V.M. Gyrocardiography as a method of non-invasive diagnosis of diseases // *Nanoindustry*, 2020, no. S96–296, pp. 381–388.
- [24] MATLAB – MathWorks – MATLAB & Simulink Website. URL: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (дата обращения 05.11.2022).
- [25] Баевский Р.М., Черникова А.Г. Анализ variability сердечного ритма: физиологические основы и основные методы проведения // *Cardiometry*, 2017. № 10. С. 66–76.

Сведения об авторах

Рулев Максим Евгеньевич  — аспирант (ассистент), ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), инженер I кат., ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ», maxxim98@yandex.ru

Ачильдиев Владимир Михайлович — канд. техн. наук, гл. конструктор микронаноэлектромеханических систем, ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ», glmnmns@gmail.com

Поступила в редакцию 03.06.2023.

Одобрено после рецензирования 10.07.2023.

Принята к публикации 23.08.2023.

REGISTRATION, PROCESSING AND ANALYSIS OF INFORMATION FROM ELECTROSEISMOCARDIOGRAPHY SYSTEM FOR RESPIRATORY DISEASES DIAGNOSTICS

M.E. Rulev^{1,2}✉, V.M. Achildiev^{1,2}

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 method of registration of cardio signals and respiratory cycles according to the signals of the electroseismocardiography unit is outlined. It has been established that all types of signals recorded by the electroseismocardiography unit carry information about the human respiratory process. The necessary information channels of the electroseismocardiography unit were selected, which are necessary for assessing the functional state by biophysical signals. A comparison of the characteristics of respiratory envelopes obtained from different biophysical signals is performed. Functional relationships for determining the parameters of respiratory cycles are proposed. Signs of increments of characteristic parameters of respiration are calculated and analyzed. The tabular results of the assessment of the variability of respiratory cycles by indicators of coefficients of variation are presented. It is revealed that the increments of such breathing parameters as periods, duration of breaths and areas enclosed under the curves of respiratory cycles coincide in the largest number of cases for all types of signals, while the values of such parameters have the highest variability indicators.

Keywords: electrocardiography, seismocardiography, gyrocardiography, electroseismocardiography unit, respiratory cycle, variability

Suggested citation: Rulev M.E., Achildiev V.M. *Registratsiya, obrabotka i analiz informatsii s ehlektroseismokardiobloka dlya diagnostiki respiratornykh zabolevaniy* [Registration, processing and analysis of information from electroseismocardiography system for respiratory diseases diagnostics]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 6, pp. 199–207. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-199-207

References

- [1] Uspenskiy V.M. *Informatsionnaya funktsiya serdtsa. Teoriya i praktika diagnostiki zabolevaniy vnutrennikh organov metodom informatsionnoy 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] Paukkunen M. *Seismocardiography: Practical implementation and feasibility*. Aalto University publication series Doctoral Dissertations, 2014, 46 p.
- [3] Lehtonen E., Saraste A., Tuominen J., Koskinen J., Teräs M., Airaksinen J., Pänkäälä M., Koivisto T. Gyrocardiography: A New Noninvasive Monitoring Method for the Assessment of Cardiac Mechanics and the Estimation of Hemodynamic Variables. *Scientific Reports*, 2017, v. 7(1), pp. 1–11. DOI: 10.1038/s41598-017-07248-y
- [4] Achil'diyev V.M., Bedro N.A., Soldatenkov V.A., Yevseyeva YU.N., Gruzevich YU.K., Levkovich A.D., Basarab M.A., Konnova N.S. Cardioseismometer unit based on micromechanical sensors. 25th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, 28–30 May, 2018, Saint Petersburg, Russia, pp. 272–281. DOI: 10.23919/ICINS.2018.8405892
- [5] D'Mello Y., Skoric J., Xu S., Roche P.J.R., Plant D.V., Lortie M., Gagnon S. Real-time cardiac beat detection and heart rate monitoring from combined seismocardiography and gyrocardiography. *Sensors*, 2019, v. 19(16), pp. 1–19. DOI: 10.3390/s19163472
- [6] Sieciński S., Kostka P.S., Tkacz E.J. Gyrocardiography: A review of the definition, history, waveform description, and applications. *Sensors*, 2020, v. 20(22), pp. 1–30. DOI: 10.3390/s20226675
- [7] Sieciński S., Kostka P.S., Tkacz E.J. Heart rate variability analysis on electrocardiograms, seismocardiograms and gyrocardiograms on healthy volunteers. *Sensors*, 2020, v. 20(16), pp. 1–16. DOI: 10.3390/s20164522
- [8] Achil'diyev V.M., Bedro N.A., Komarova M.N., Rulev M.E., Yevseyeva YU.N., Uspenskiy V.M., Gruzevich YU.K. Gyrocardiography unit for non-invasive human diseases diagnosis. 27th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, 25–27 May, 2020, Saint Petersburg, Russia, pp. 1–7. DOI: 10.23919/ICINS43215.2020.9133891
- [9] Achil'diyev V.M., Gruzevich YU.K., Yevseyeva YU.N., Baldin A.V., Spasenov A.YU., Kucherov K.V., Rulev M.E., Shabayev R.G., Bedro N.A. *Sposob neinvazivnogo opredeleniya biofizicheskikh signalov* [Method of non-invasive determination of biophysical signals]. Pat. 2761741 of the Russian Federation, applicant and patent holder of SPU «Geophizika-NV», LLC «ARK Sistems», 2021, bul. no. 35.
- [10] 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.
- [11] Achil'diyev V.M., Gruzevich YU.K., Soldatenkov V.A., Bedro N.A., Evseeva YU.N., Komarova M.N., Rulev M.E., Uspenskiy V.M. Electrocardiography system for human diseases screening. *Nanoindustry*, 2020, no. S5–2, v. 13, pp. 583–593.
- [12] Klum M., Urban M., Tigges T., Pielmus A., Feldheiser A., Schmitt T., Orglmeister R. Wearable Cardiorespiratory Monitoring Employing a Multimodal Digital Patch Stethoscope: Estimation of ECG, PEP, LVET and Respiration Using a 55 mm Single-Lead ECG and Phonocardiogram. *Sensors*, 2020, v. 20(27), pp. 1–21. DOI: 10.3390/s20072033
- [13] Sayers B.M. Analysis of heart rate variability. *Ergonomics*, 1973, v. 16(1), pp. 17–32. DOI: 10.1080/00140137308924479
- [14] Rulev M.E., Achil'diev V.M., Gruzevich YU.K., Bedro N.A. *Pervichnaya obrabotka biofizicheskikh signalov elektroseismokardiobloka* [Primary processing of biophysical signals of an electroseismocardiography unit]. 29-th Saint Petersburg international conference on integrated navigation systems (ICINS), 2022, pp. 26–29.

- [15] Gruzevich Yu.K., Uspenskiy V.M., Achil'diyev V.M. *Elektrokardiobloki vysokogo razresheniya dlya skringing-indikatsii zabolovaniy 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.
- [16] 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 zabolovaniy cheloveka* [Electroseismocardiography system for non-invasive human diseases diagnosis]. 26-th Saint Petersburg international conference on integrated navigation systems (ICINS), 2019, pp. 233–236.
- [17] Soldatenkov V.A., Gruzevich YU.K., Achil'diyev V.M., Bedro N.A., Yevseyeva YU.N., Basarab M.A., Konnova N.S. *Seysmokardioblok i sposob izmereniya seysmokardiotsikla* [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, bul. 4.
- [18] Delphi – Embarcadero Website. Available at: <https://www.embarcadero.com/ru/products/delphi> (accessed 02.11.2022).
- [19] Bendat. J., Piersol. A. *Random data: analysis and measurement procedures*. New York, Wiley-Interscience, 1971, 407 p.
- [20] Paukkunen, M., Linnavuo, M., Sepponen, R. A Portable Measurement System for the Superior-Inferior Axis of the Seismocardiogram. *J. of bioengineering and biomedical science*, 2013, pp. 1–4. DOI: 10.4172/2155-9538.1000123
- [21] Sanyukevich L.I. *Kratkiy slovar 'fiziologicheskikh terminov* [A short dictionary of physiological terms]. Minsk: Hight School, 1992, 206 p.
- [22] Rulev M.E., Achil'diev V.M. *Registratsiya i metody obrabotki biofizicheskikh signalov dlya neinvazivnoy diagnostiki zabolovaniy cheloveka* [Registration and methods of processing biophysical signals for non-invasive diagnosis of human diseases]. Annual National Scientific and Technical Conference of the teaching staff, postgraduates and students of the Mytishchi branch of the Bauman Moscow State Technical University based on the results of research works for 2021. Conference materials. Under the general editorship of Sanaev V.G. Krasnoyarsk, 2022, pp. 150–152.
- [23] Achil'diyev V.M., Bedro N.A., Gruzevich YU.K., Evseeva YU.N., Komarova M.N., Rulev M.E., Soldatenkov V.A., Uspenskiy V.M. Gyrocardiography as a method of non-invasive diagnosis of diseases. *Nanoindustry*, 2020, no. S96–296, pp. 381–388.
- [24] MATLAB – MathWorks – MATLAB & Simulink Website. Available at: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (accessed 05.11.2022).
- [25] Baevskiy R.M., Chernikova A.G. *Analiz variabel'nosti serdechnogo ritma: fiziologicheskie osnovy i osnovnye metody provedeniya* [Analysis of heart rate variability: physiological bases and basic methods of conducting]. *Cardiometry*, 2017, v. 10, pp. 66–76.

Authors' information

Rulev Maksim Evgenyevich  — pg. of the BMSTU (Mytishchi branch), Engineer 1-st category of the «Scientific Production Unity GEOPHIZIKA-NV» Stock Company, maxxim98@yandex.ru

Achil'diev Vladimir Mikhaylovich — Cand. Sci. (Tech.), Chief designer of micronanoelectromechanical systems of the «Scientific Production Unity GEOPHIZIKA-NV» Stock Company, glmnems@gmail.com

Received 03.06.2023.

Approved after review 10.07.2023.

Accepted for publication 23.08.2023.

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

**К 75-летию кафедры «Ландшафтная архитектура и садово-парковое строительство» факультета «Лесное хозяйство, лесопромышленные технологии и садово-парковое строительство» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал).
Исторические аспекты**

Подготовка профессионалов в области озеленения городов имеет многолетнюю историю. На июньском Пленуме ЦК ВКП(б) 1931 г. был рассмотрен вопрос об озеленении городов и возможности подготовки специалистов «зеленого строительства». Однако первые профильные кафедры и факультеты были учреждены уже в послевоенное время в Ленинградской лесотехнической академии (ЛТА, ныне Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова) и в Московском лесотехническом институте (МЛТИ, ныне МГТУ им. Н.Э. Баумана, Мытищинский филиал). В этих образовательных учреждениях предполагалась подготовка специалистов для всей страны.

В Московской сельскохозяйственной академии имени К.А. Тимирязева (МСХА, ныне Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева) открылось отделение подготовки специалистов по цветоводству. Структуры новых факультетов включали в себя взаимно дополняющие кафедры — «Садово-парковое искусство» и «Декоративное растениеводство».

Началом профессиональной подготовки специалистов — инженеров по озеленению населенных пунктов послужило постановление Совета Министров СССР и ЦК ВКП(б) от 20 октября 1948 года № 3960 «О плане полезащитных лесонасаждений, внедрения травопольных севооборотов, строительства прудов и водоемов для обеспечения высоких устойчивых урожаев в степных и лесостепных районах европейской части Советского Союза». Согласно этому документу, в частности, планировалось проведение научно обоснованных работ по борьбе с засухой. Наряду с мероприятиями, включающими в себя посадки лесозащитных насаждений на засушливых территориях, предусматривались укрепление оврагов, устройство водоемов, а также озеленение в первую очередь населенных пунктов, подвергаемых суховеям, с помощью создания защитных зеленых зон.

Подготовке необходимых специалистов способствовали масштабные работы послевоенных лет по восстановлению городов, благоустройству и озеленению улиц, магистралей, устройству скверов и бульваров. С 1948 г. в связи с 800-летием на центральных магистралях Москвы начались массовые посадки крупномерных деревьев и цветочное оформление главных городских объектов. В работах принимали участие такие теоретики и практики в этой среде, как архитекторы В.И. Долганов, М.П. Коржев, М.П. Прохорова, Л.С. Залеская, З.А. Николаевская.

Большой объем работ был выполнен по восстановлению Ленинграда — созданы Парк Победы, новые городские сады, скверы, стали принимать посетителей загородные дворцово-парковые комплексы — Петергоф, Царское Село, Ораниенбаум (архитекторы Т.Б. Дубяго О.А. Иванова, Л.И. Ильин, Л.И. Рубцов и др.).

Развитию факультетов способствовали впервые вышедшие в свет труды О.А. Ивановой, Т.Б. Дубяго, М.П. Коржева Л.О. Машинского, С.Н. Палентреер, Л.С. Залеской, Л.И. Рубцова, Л.Б. Лунца и других по теории и практике озеленения городов. На факультетах были сформированы учебно-методические основы подготовки инженеров зеленого строительства как специалистов широкого профиля для работы в проектных и производственных организациях по созданию озелененных территорий в пределах жилой и промышленной застройки, в оранжерейно-питомническом хозяйстве, в реставрационных мастерских по реконструкции/реставрации памятников садово-паркового искусства.

Научно-методическая и педагогическая деятельность факультета озеленения Московского лесотехнического института опиралась на опыт, теорию и практику озеленения территорий новых жилых кварталов, магистралей, скверов и бульваров, городских парков в предвоенные и послевоенные годы. Обучение студентов велось по разработанному учебному плану и рабочим программам, включавшим изучение вопросов архитектурной графики и композиции, озеленения городов с основами градостроительства, истории и теории садово-паркового искусства, ландшафтного проектирования, технологии строительства и содержания объектов озеленения, декоративного растениеводства. Такой набор дисциплин послужил формированию профессиональных компетенций будущих специалистов.

В период с 1948 по 1958 гг. в вузах Москвы и Ленинграда было подготовлено свыше 300 специалистов — инженеров зеленого строительства, приступивших к работе по профилю в городском и коммунальном хозяйствах городов и поселков, а также в проектных институтах и строительных организациях, в оранжерейно-питомнических хозяйствах. Первые выпускники факультета озеленения городов МЛТИ 1953–1955 гг. активно участвовали в озеленении территорий крупнейших архитектурных комплексов: МГУ им. М.В. Ломоносова, Центрального стадиона им. В.И. Ленина (ныне — стадион «Лужники»), ВДНХ, а также озеленяли скверы, бульвары, жилые районы.

Факультет озеленения городов МЛТИ организовал заведующий кафедрой «Декоративное растениеводство» Д.В. Николаев. Большую помощь в подготовке учебной программы и курсов лекций оказали архитекторы Л.С. Залеская, Е.П. Чаус, А.Н. Александрова и др.

Кафедрой «Садово-парковое искусство» стал заведовать крупный специалист в области озеленения городов К.А. Виноградов, преподавали С.Н. Палентреер, Н.С. Смирнов, Н.Е. Чепурина, М.Л. Стельмахович, С.А. Ижевский, А.М. Авдошин, Т.А. Бобылева (Соколова), В.М. Лавриченко.

В 1958 г состоялся последний выпуск по специальности «Инженер зеленого строительства». На основании приказа Министерства высшего образования подготовка специалистов стала осуществляться на факультете «Лесное хозяйство и озеленение городов» по специализации «Озеленение населенных мест». Кафедры «Декоративное растениеводство» и «Садово-парковое искусство» объединили в одну кафедру — «Озеленение городов».

Объединенному коллективу преподавателей удалось сохранить традиции озеленения и научно-педагогический потенциал, необходимый для подготовки квалифицированных специалистов — инженеров по озеленению городов. Впоследствии к работе на кафедре присоединились В.С. Теодоронский, Л.М. Фурсова, А.Н. Смирнов, В.А. Фролова, И.А. Кабаева, В.П. Панкратов, О.Н. Кочетова и др.

При факультете «Лесное хозяйство» на кафедре «Озеленение городов» сложились два направления подготовки специалистов:

1) проектно-исследовательское, связанное с ландшафтным проектированием объектов озеленения на основе теории садово-паркового и ландшафтного искусства;

2) растениеводческое, связанное с культивированием, изучением процессов роста и развития декоративных растений, их устойчивости при посадках в городской среде.

Оба направления были тесно связаны и дополняли одно другое.

Проектно-исследовательское направление связано с научно-педагогической деятельностью Н.С. Смирнова, С.Н. Палентреер, Н.Е. Чепуриной. Значительный вклад в теорию озеленения городов и поселков страны с учетом их площади, хозяйственного профиля, природно-климатических факторов внес Н.С. Смирнов, заложивший градостроительные и инженерные основы подготовки специалистов. В новую учебную программу вошла дисциплина «Озеленение населенных мест», содержащая теоретические вопросы создания объектов озеленения с архитектурных и инженерно-градостроительных позиций. В новой дисциплине были выделены специальные разделы создания зеленых насаждений: «Садово-парковое строительство», «Вертикальная планировка озеленяемых территорий», которые впоследствии изданы как учебные пособия.

Наряду с чтением курса лекций разрабатывались методические указания к выполнению курсовых работ и проектов, связанных с ландшафтной организацией открытых пространств городской среды. Под руководством Н.С. Смирнова на кафедре начались исследования по проблеме повышения комфортности урбанизированной среды средствами озеленения: были изучены вопросы улучшения условий на магистралях и улицах, в парках и на спортивных площадках. Н.С. Краснощекова, А.С. Яблоков и Л.Н. Николаева по данной тематике защитили кандидатские диссертации. Н.С. Смирнов (в соавторстве с Л.О. Машинским и О.А. Ивановой) издал в МЛТИ монографию «Озеленение городов. Из практики советского градостроительства».

Одним из крупнейших специалистов в области истории садово-паркового и ландшафтного искусства можно назвать С.Н. Палентреер, выдающегося исследователя и талантливого педагога. Еще в 1930-е годы она изучала особенности планировки московских приусадебных парков как объектов садово-паркового искусства. Педагогическая деятельность С.Н. Палентреер нашла широкое отражение в корректировке учебных программ, разработке курса лекций по истории садово-паркового и ландшафтного искусства, проведении учебно-методических работ по проектированию парков как основных объектов городского озеленения (в соавторстве с Н.Е. Чепуриной).

В деле совершенствования учебного процесса большое значение имели научно-методические работы, посвященные историческому анализу памятников садово-паркового искусства, их планировке и пространственным решениям. В работе С.Н. Палентреер «Ландшафтное искусство» представлено описание способов планировки парков и построения композиции с использованием примеров из исторического наследия. Опыт, накопленный многолетней практикой, нашел отражение в работе С.Н. Палентреер «Ландшафты лесопарков и парков», в которой, кроме того, представлена концепция и система приемов советского паркостроения, даны описания и схемы некоторых парков страны. С.Н. Палентреер выпустила блестящую плеяду учеников в области ландшафтной архитектуры, которые посвятили себя этой профессии и оставили богатое наследие.

Растениеводческое направление подготовки специалистов связано с изучением агрономии и биологии. Одним из крупных ученых в этой области можно назвать С.А. Ижевского, заведующего кафедрой «Декоративное растениеводство» и впоследствии кафедрой «Озеленение городов», как специалиста по систематизации и выращиванию роз. С.А. Ижевский написал курс лекций по цветоводству и питомникам, организовал практическую работу непосредственно на опытных участках при посадках декоративных растений и квалифицированном уходе за ними, руководил учебным процессом.

Под руководством С.А. Ижевского его ученик В.М. Лавриченко провел исследования по выращиванию роз на гидропонике и защитил кандидатскую диссертацию по данной теме.

Е.М. Авдошиным были разработаны конструкции холодильных установок по испытанию корневых систем деревьев, что послужило основой практического развития пересадки деревьев в зимнее время.

Т.А. Соколова с 1969 по 1972 гг. исполняла обязанности заведующей кафедрой «Озеленение городов», показав себя разносторонним исследователем, методистом и педагогом, занималась изучением корневых систем деревьев при пересадках на объекты озеленения. Под ее руководством в рамках проводимых исследований по декоративному растениеводству были написаны учебно-методические пособия, разработаны теоретические основы цветоведения применительно к декоративным цветочным растениям, созданы системы шкал и атлас для подбора цветочных растений по использованию на городских объектах. Теоретические основы цветоводства широко применялись на практике при подборе декоративных растений для озеленения объектов. Т.А. Соколовой изданы методические указания по реконструкции территорий жилой застройки с разработкой методики инвентаризационной оценки насаждений.

Положительный вклад в растениеводческую подготовку специалистов внес зав. кафедрой с 1973 по 1984 гг. Я.И. Мулкиджанян. Им опубликованы несколько статей по озеленению городов, методические указания по ведению учебного процесса и учебное пособие, а также разработан метод хранения декоративных растений в специальных холодильных установках.

В дальнейшем под руководством В.С. Теодоронского были развернуты исследования, касающиеся проблемы ликвидации сроков сезонности посадочных работ в городском зеленом строительстве. Работа велась совместно с учеными (выпускниками МЛТИ) Сектора озеленения городов при Академии коммунального хозяйства им. К.Д. Памфилова по утвержденному заданию правительства Москвы. Активное участие в разработке приняли научные сотрудники кафедры Н.Я. Попова, Г.Г. Лопатина, Г.Л. Кострова, В.П. Панкратов, Л.В. Бекина и др. В частности, была разработана технология массовых пересадок древесных растений из питомников на объекты городского озеленения в течение всего весенне-летне-осеннего периода с помощью эффективных средств регулирования жизнедеятельности растительных организмов.

В 1960-е годы был поставлен вопрос о введении в систему высшего образования новой специальности — «Ландшафтная архитектура». Понятие «ландшафтная архитектура» возникло как область науки и профессиональной практики в США. Родоначальником американской ландшафтной архитектуры был журналист и общественный деятель Фредерик Ло Олмстед. В 1857 г. он совместно с британским архитектором Калвертом Воксом выиграл конкурс на создание проекта Центрального парка в Нью-Йорке. При строительстве парка был сформирован своеобразный искусственный ландшафт с учетом социальных потребностей городского жителя.

Первая образовательная программа по ландшафтной архитектуре разработана в Гарвардском университете в начале XX в. С тех пор десятки университетов во многих странах мира открыли отделения и кафедры ландшафтной архитектуры.

Международная организация труда при ООН в Женеве в 1961 г. официально включила профессию «Ландшафтная архитектура» в международный реестр профессий.

В декабре 1961 г. правление Союза архитекторов СССР провело международное совещание, на основе которого в 1963 г. вышел сборник статей «Ландшафтная архитектура» под ред. Л.С. Залесской. Издание было посвящено актуальным вопросам озеленения городов, ландшафтному и садово-парковому искусству. Л.С. Залеская опубликовала статью о ландшафтном проектировании в зарубежных странах, в которой детально раскрыла понятие и смысл ландшафтной архитектуры и ее значение.

Такие крупные специалисты, как М.П. Коржев, Л.И. Рубцов, О.А. Иванова, А. Нийне, И.И. Петров, И.С. Косаревский, С.Н. Палентреер и другие в своих статьях затронули вопросы о теоретических положениях ландшафтной архитектуры. В статье практиковавшего в СССР американского ландшафтного архитектора Л.Е. Розенберга был рассмотрен вопрос о сущности профессии ландшафтного архитектора как специалиста особого профиля, призванного решать вопросы открытых общественных пространств для их использования на благо человека.

Учебная программа для высших учебных заведений по подготовке специалистов должна была включать в себя вопросы дендрологии, лесоводства, почвоведения, экологии и защиты растений, а также характеристику особенностей красоты естественного ландшафта и его оставляющих, их взаимосочетаний и изменчивости, законы воздействия архитектурно-ландшафтного искусства на человека. Кроме того, программа должна была содержать описание приемов композиции на основе исторических сведений о садово-парковом искусстве и строительстве. В обучение будущих специалистов следовало ввести преподавание рисования и черчения, архитектурной и компьютерной графики, изучение основных элементов городского хозяйства и ландшафтного планирования.

Термин «ландшафтная архитектура» в России стал использоваться с середины 1960-х годов. Решение о конкретных вузах, в которых бы велась подготовка специалистов, было принято не сразу, поскольку архитектурные вузы имели хорошую базу архитектурно-художественной подготовки, однако без ландшафтно-экологической и растениеводческой составляющих. В этом отношении проявились кафедры МЛТИ и ЛТА, которые наряду с растениеводческой базой имели научный и педагогический потенциал

в рамках садово-паркового и ландшафтного искусства и строительства, чему способствовало проведение ландшафтных исследований в 1970–1980-е годы учеными и педагогами на кафедре «Озеленение городов» по процессам формирования зеленых насаждений в садах, парках, лесопарках, исходя из ландшафтно-экологических и эстетических позиций.

В частности Л.М. Фурсовой проведена систематизация эстетических свойств ландшафта лесопарковых зон Большого Сочи для целей рекреации, развито ландшафтно-экологическое направление, связанное с формированием и освоением ландшафта на экологическом фундаменте и эстетической основе, разработана оригинальная методика пофакторного ландшафтного анализа, которая легла в основу методов и приемов проектирования.

Проведенные Л.М. Фурсовой исследования позволили уточнить и сформулировать теоретические положения ландшафтного искусства, касающиеся пейзажного разнообразия парковых композиций, что имело существенное значение для развития образовательного процесса и формирования у студентов углубленных знаний и практических навыков ландшафтного проектирования.

Подготовка специалистов по специализации «озеленение городов» в рамках специальности «Лесное хозяйство» МЛТИ велась долгие годы. В 1985 г. кафедра получила новое название — «Садово-парковое строительство» и руководить ею стал В.С. Теодоронский (с 1985 по 2011 гг.), разработавший индивидуальный план подготовки специалистов, отличный от общего учебного плана. В 1988 г. была выделена специальность «Лесное и садово-парковое хозяйство» и позднее утверждена специальность «Садово-парковое и ландшафтное строительство», а также разработаны новые учебный план и учебные программы с ориентацией на подготовку специалистов в области ландшафтной архитектуры. В дипломах выпускников кафедры значилась специальность: «Инженер садово-паркового и ландшафтного строительства».

В рамках учебно-методического объединения по образованию в области лесного дела группа ученых, педагогов и практикующих ландшафтных архитекторов разработала новые требования (Федеральные Государственные образовательные стандарты, ФГОС+1). В 2002 г. в соответствии с постановлением Министерства труда и социального развития РФ № 38 от 31.05.2002 г. «О внесении дополнений в Квалификационный справочник должностей руководителей, специалистов и других специальностей» была введена должность «ландшафтный архитектор». Занимать ее имели возможность инженерные кадры со специальностью «Садово-парковое и ландшафтное строительство», которую признали базовой для профессии.

В лесоводстве было введено понятие лесоведения с основами фитоценологии (кафедра лесоводства), в лесных культурах — понятие лесомелиорации ландшафтов (кафедра лесных культур). На кафедре селекции и дендрологии в деле дендрологической подготовки специалистов важное значение имела деятельность А.Я. Любавской, Н.В. Котеловой, О.Н. Виноградовой.

Впоследствии были введены дисциплины, изучающие гидротехнические сооружения в ландшафтах, основы инженерной подготовки озеленяемых территорий с расширением программы организации рельефа (вертикальной планировки). Так развивалась новая специальность.

Важный вклад в работу кафедры садово-паркового строительства МГУЛ внесли научно-исследовательские изыскания по заданию правительства Москвы *в рамках экологического мониторинга состояния зеленых насаждений* (1994–2000). Были выполнены научные исследования по проблемам пространственной структуры, оценке состояния конструктивных элементов, ассортименту древесных и травянистых растений, формированию насаждений в пределах городских объектов. Исследования динамики роста и развития насаждений, их изменчивости в сложившихся условиях под влиянием увеличивающихся рекреационных нагрузок позволили перейти к прогностическим оценкам плотности посадок растений на различных по своим функциям объектах и предложить методы «щадящей» реконструкции, выявить пешеходную доступность и проницаемость границ территорий, актуализировать архитектурно-планировочные задания по проектированию объектов озеленения в городской среде. Результатом стала разработка методических рекомендаций по перечисленным направлениям.

Во всех этих работах активно участвовали преподаватели кафедры В.С. Теодоронский (руководитель), В.А. Фролова, И.А. Кабаева, О.Н. Кочетова, Ю.В. Разумовский, И.Ю. Бочкова, О.В. Дмитриева, Е.А. Редькина, М.Н. Новиков, С.Г. Ниц, И.В. Мочалов, Т.С. Санаева, Н.Ю. Гришина, И.В. Ерзин, В.А. Леонова, О.Н. Бобылева, Г.А. Зайцев, А.А. Золотаревский, О.В. Чернышенко, Е.В. Голосова и др. Полученные результаты нашли отражение в рабочих программах дисциплин и усовершенствовали ландшафтное образование.

Для учебного процесса требовались тематические учебные пособия и учебники. Так, вышли в свет работы «Ландшафтное искусство», «Озеленение населенных мест», «Садово-парковое строительство и хозяйство», «Декоративное растениеводство», «История садово-паркового искусства. Древний мир», «Вертикальная планировка озеленяемых территорий» и др. В изданиях широко освещены теоретические вопросы и практические достижения в области озеленения городов, ландшафтной архитектуры и садово-паркового строительства.

К 1999 г. в МГУЛ назрела необходимость создания *факультета «Ландшафтная архитектура»*. Большую роль сыграли общественные организации (Ассоциация ландшафтных архитекторов России АЛАРОС, председатель Т.И. Волфтруб). Инициатива исходила от ректора МГУЛ А.Н. Обливина, по поручению которого В.С. Теодоронским были разработаны программные материалы для образования факультета, в состав которого были включены специальные кафедры и кафедры лесного профиля. Программа была одобрена на ученом совете МГУЛ.

В 2000 г начал свою работу факультет «Ландшафтная архитектура», первым деканом которого стал Н.А. Комаров, организовавший большую работу по профилю «Рисунок», «Архитектурная и компьютерная графика» (О.И. Васильева, А.С. Летин). Структура факультета объединяла несколько взаимозависимых кафедр, отвечающих за научно-методическую подготовку специалистов-инженеров по направлениям «Ландшафтная архитектура» и «Садово-парковое строительство».

В рамках факультета были организованы кафедры: «Ландшафтная архитектура и садово-парковое строительство», зав. кафедрой В.С. Теодоронский; «Начертательная геометрия», зав. кафедрой Н.А. Комаров; «Архитектурная и компьютерная графика», зав. кафедрой Н.А. Комаров; «Архитектурная графика, композиция и рисунок», зав. кафедрой В.В. Дормидонтова; «Геодезия и строительное дело», зав. кафедрой В.И. Запруднов; «Декоративное растениеводство», зав. кафедрой И.Ю. Бочкова и затем О.В. Чернышенко.

В 2010 г. деканом факультета стала В.А. Фролова. Состоялось открытие 2-х ступенчатой подготовки специалистов (бакалавры и магистры) по направлению 250700 «Ландшафтная архитектура».

В 2016 г. факультет «Ландшафтная архитектура» был реорганизован путем объединения. Кафедра «Ландшафтная архитектура и садово-парковое строительство» под руководством В.А. Фроловой вошла в состав факультета «Лесное хозяйство, лесопромышленные технологии и садово-парковое строительство». В рамках нового факультета на кафедре сохранились основные блоки дисциплин «Архитектурная и компьютерная графика», «Геодезия и строительное дело», «Садово-парковое искусство и ландшафтное проектирование», «Декоративное растениеводство». Наряду с дисциплинами, формирующими навыки творчества и ландшафтного проектирования, большое значение приобрела естественно-биологическая составляющая — декоративные растения в ландшафтной архитектуре, цветоводство, древоводство и питомники.

Для развития ландшафтного образования нового качества было выполнено обобщение отечественного и зарубежного опыта в сфере профессиональной деятельности, собраны и проанализированы учебные программы ведущих зарубежных университетов, федеральные образовательные стандарты обоснованы компетентностной основой ландшафтного образования. Формирование профессиональных компетенций определялось приобретением необходимых профессиональных качеств в виде знаний, умений, навыков и способностью их применения для решения конкретных ситуационных задач в профессиональной деятельности.

Прием на обучение по специальности «Ландшафтная архитектура» оказался осложнен некоторыми проблемами. В частности, при наборе будущих специалистов необходим их тщательный отбор, поскольку абитуриенты должны иметь призвание и обладать способностями осуществлять деятельность в сфере ландшафтной архитектуры, т. е. требуется сдача специального экзамена-теста по рисунку. Без навыков рисования невозможно полное освоение учебной программы.

В настоящее время на кафедре «Ландшафтная архитектура и садово-парковое строительство» под руководством В.В. Дормидонтовой, автора многочисленных научных статей, монографий по теории садово-паркового искусства и ландшафтной архитектуры, продолжают работы по совершенствованию процесса подготовки специалистов по направлению «Ландшафтная архитектура». Корректируются учебные и рабочие программы учебного плана как для бакалавров, так и для магистров, подготовлен новый Государственный стандарт (ФГОС++4) и примерные образовательные программы *нового поколения* по специальности ландшафтная архитектура с сохранением идей и традиций подготовки специалистов, заложенных 75 лет тому назад выдающимися учеными и педагогами.

Кафедра «Ландшафтная архитектура и садово-парковое строительство», отмечая свой 75-летний юбилей, активно участвует в деятельности профессионального сообщества, сотрудничает с предприятиями, Комитетом по архитектуре и градостроительству города Москвы, правительствами Москвы и Московской области, Ассоциацией ландшафтных архитекторов России (АЛАРОС), Московского объединения ландшафтных архитекторов (МОЛА), Международной федерацией ландшафтных архитекторов (IFLA) и является членом Ассоциации производителей посадочного материала (АППМ).

Выпускники кафедры «Ландшафтная архитектура и садово-парковое строительство» трудятся в проектных бюро и строительных компаниях ландшафтной индустрии в Москве, Санкт Петербурге, Сочи и других городах России, возглавляют проектные бюро и строительные компании.

*В.С. Теодоронский, профессор, д-р с.-х. наук,
действительный член РАЕН, член Союза московских архитекторов,
член Президиума Ассоциации ландшафтных архитекторов России (АЛАРОС),
Президент Московского объединения ландшафтных архитекторов*