

# ЛЕСНОЙ ВЕСТНИК / FORESTRY BULLETIN

Научно-информационный журнал

№ 1 ' 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. Королева, 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, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург

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

**Деглиз Ксавье**, д-р с.-х. наук, профессор, Академик IAWS, академик Французской академии сельского хозяйства, Нанси, Франция  
**Драпалюк Михаил Валентинович**, д-р техн. наук, профессор, ректор ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, Воронеж

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

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

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

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

**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  
**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

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

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

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

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

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

**Титов Анатолий Матвеевич**, канд. техн. наук, зам. начальника отделения, ученый секретарь Совета ЦУП ЦНИИМАШ, Королёв  
**Тричков Нено Иванов**, профессор, доктор, проректор по научной работе Лесотехнического университета, София, Болгария

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

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

**Спаченко 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. Карпухиной

Электронная версия Ю.А. Рязской

Учредитель МГТУ им. Н.Э. Баумана

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

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-68118 от 21.12.2016

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

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

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

Дата выхода в свет 29.12.2022

Тираж 600 экз.

Заказ №

Объем 19,0 п. л.

Цена свободная

# LESNOY VESTNIK / FORESTRY BULLETIN

Scientific Information journal

No. 1 ' 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.), Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Sankt-Peterburg  
**Burmistrova Olga Nikolaevna**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Ukhta State Technical University, Ukhta  
**Chubinskiy Anatoliy Nikolaevich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Saint Petersburg State Forest Technical University, St. Petersburg  
**Chumachenko Sergey Ivanovich**, Professor, Dr. Sci. (Biol.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow  
**Deglise Xavier**, Dr. Sci. (Agric.), Academician of the IAWS, Academician of the French Academy of Agriculture, Nancy, France  
**Drapalyuk Mikhail Valentinovich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Rector of VSUFT, Voronezh  
**Evdokimov Yuriy Mikhaylovich**, Professor, Ph. D. (Chemical); academician of the New York Academy of Sciences, corr. Academy of Natural Sciences, a member of the Central Board of Nanotechnology Society of Russia, Moscow  
**Zalesov Sergey Veniaminovich**, Professor, Dr. Sci. (Agric.), USFEU, Ekaterinburg  
**Zaprudnov Vyacheslav Il'ich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow  
**Ivankin Andrey Nikolaevich**, Professor, Dr. Sci. (Chemical), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow  
**Kiryukhin Dmitriy Pavlovich**, Dr. Sci. (Chemical), IPCP RAS, Chernogolovka  
**Klassen Nikolay Vladimirovich**, Ph. D. (Phys.-Math.), ISSP RAS, Chernogolovka  
**Kovachev Atanas**, Corresponding Member of the Bulgarian Academy of Sciences, Dr. Sci., Professor, University of Forestry, Bulgaria, Sofia  
**Kokh Nil's Elers**, Professor, the Dr. of agronomics in the field of forest policy, the President of IUFRO, the Center of forest and landscape planning of university Copenhagen, Denmark  
**Komarov Evgeniy Gennadievich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow  
**Korol'kov Anatoliy Vladimirovich**, Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow  
**Kotiev George Olegovich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow  
**Kozlov Aleksandr Il'ich**, Ph. D. (Tech.), Scientific Secretary of the Board of «NPO IT», Korolev  
**Kozhukhov Nikolay Ivanovich**, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Econ.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow  
**Krott Maks**, Professor of Forest politics specialization, George-August-Universitet, Goettingen

**Lipatkin Vladimir Aleksandrovich**, Professor, Ph. D. (Biol.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow  
**Lukina Natalya Vasilyevna**, Corresponding Member of the RAS, Professor, Director of the Center for Sub-Settlement Research RAS, Deputy Chairperson of the Forest Research Council  
**Makuev Valentin Anatol'evich**, Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor, BMSTU (Mytishchi branch), Moscow  
**Malashin Alexey Anatolyevich**, Professor, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow  
**Martynuk Aleksandr Aleksandrovich**, Academician of the RAS, Dr. Sci. (Agric.), VNIILM, Moscow  
**Melekhov Vladimir Ivanovich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, NARFU, Arkhangelsk  
**Moiseyev Aleksandr Nikolaevich**, Senior Researcher, European Forest Institute, Joensuu, Finland  
**Nakvasina Elena Nikolaevna**, Professor, Dr. Sci. (Agric.), Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Higher School of Natural Sciences and Technology, Arkhangelsk  
**Niemz Peter**, Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c., Prof. for Wood Physics, ETH Zurich (Swiss Federal Institute of Technology in Zurich; Eidgenossische Technische Hochschule Zurich)  
**Oblivin Aleksandr Nikolaevich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Academician of the Russian Academy of Natural Sciences and MANVSh, Honored worker of science and equipment of the Russian Federation, BMSTU, Moscow  
**Pasztory, Zoltan**, Dr., Ph.D., Director of Innovation Center, University of Sopron, Sopron, Hungary  
**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 29.12.2022  
Circulation 600 copies  
Order №  
Volume 19,0 p. p.  
Price free

# СОДЕРЖАНИЕ

## БИОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА

<b>Румянцев Д.Е., Рысин С.Л., Коженкова А.А., Александров П.С., Воробьева Н.С., Епишков А.А.</b> Рост туи западной ( <i>Thuja occidentalis</i> L.) в дендрарии Главного ботанического сада им. Н.В. Цицина РАН по данным дендрохронологического анализа .....	5
<b>Стороженко В.Г.</b> Санитарное состояние коренных ельников тайги Европейской России .....	17
<b>Танцырев Н.В., Иванова Н.С., Петрова И.В.</b> Формирование корнесомкнутой лесной экосистемы выше границы леса в горах Северного Урала .....	26
<b>Терентьева О.С., Рохлова Е.Л., Хмельщикова И.Г.</b> Дигрессия напочвенного покрова растительных сообществ рекреационных стоянок на территории национального парка «Валдайский» .....	35
<b>Горелекин И.В.</b> Использование сорбционно-стимулирующих препаратов для обработки семян и взаимодействие аллелотоксинов почв с растениями .....	45
<b>Тазиев И.Р., Мухаметшина А.Р., Петрова Г.А., Тазмеев Н.М.</b> Эффективность применения фунгицида «Азорро, КС» при выращивании сеянцев дуба черешчатого в условиях открытого и закрытого грунта .....	53
<b>Войтов Д.Ю., Васильев С.Б., Кормилицын Д.В.</b> Разработка технологии определения породы деревьев с применением компьютерного зрения .....	60
<b>Гниненко Ю.И., Цуканов Я.В., Галич Д.Е., Чеплянский И.Я.</b> Восточный майский хрущ — несколько забытая, но вновь реальная угроза .....	67

## ЛАНДШАФТНАЯ АРХИТЕКТУРА

<b>Киреева Т.В., Вишнякова Е.Н.</b> Нормативно-правовое регулирование озеленения набережных в современной России .....	75
---	----

## ДЕРЕВООБРАБОТКА И ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

<b>Иванкин А.Н.</b> Химическая и биодegradация белковых компонентов растительного происхождения .....	85
<b>Баскаков С.А., Баскакова Ю.В., Кабачков Е.Н., Кичигина Г.А., Куц П.П., Кирухин Д.П., Красникова С.С., Бадамшина Э.Р., Солдатенков Т.А., Василец В.Н., Милович Ф.О., Шульга Ю.М.</b> Гидрофобизация пленок целлюлозы, полученной из стебля борщевика Сосновского, растворами теломеров тетрафторэтилена .....	95
<b>Евдокимов Ю.М., Сулименко В.А., Мещеряков А.В., Русских Д.В.</b> История создания электроадгезионных соединений .....	107
<b>Серегин Н.Г., Запруднов В.И.</b> Механоактивационный способ получения вяжущего для устройства цементогрунтовых свай .....	114
<b>Талипова М.В., Лянг А.В., Щербак Н.В.</b> Разработка фильтрующе-сорбирующих материалов в целях формирования ассортимента современных фильтров для противогазов и респираторов .....	121
<b>Прокофьев Г.Ф., Коваленко О.Л.</b> Определение времени периодичности заточки (переточки) зубьев ленточных пил .....	134

## ЛЕСОИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО

<b>Соколов А.П., Селиверстов А.А., Суханов Ю.В., Сенькин В.А.</b> О влиянии частичной автоматизации управления манипуляторами на эргономические показатели лесозаготовительных машин .....	139
---	-----

# CONTENTS

## BIOLOGICAL AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF FORESTRY

<b>Rumyantsev D.E., Rysin S.L., Kozhenkova A.A., Aleksandrov P.S., Vorob'eva N.S., Epishkov A.A.</b> White cedar growth in the N.V. Tsitsin Main Botanical Garden arboretum of Russian Academy Of Sciences according to dendrochronological analysis .....	5
<b>Storozhenko V.G.</b> Sanitary condition of native taiga spruce in European Russia .....	17
<b>Tantsyrev N.V., Ivanova N.S., Petrova I.V.</b> Root-closed forest ecosystem formation above forest boundary in Northern Urals mountains .....	26
<b>Terent'eva O.S., Rokhlova E.L., Khmel'shchikova I.G.</b> Plant communities ground cover digression of recreational sites in Valday National Park .....	35
<b>Gorepekin I.V.</b> Use of sorption-stimulating preparations for seed treatment and interaction of soil allelotoxins with plants .....	45
<b>Taziev I.R., Mukhametshina A.R., Petrova G.A., Tazmeev N.M.</b> Application efficiency of «Azorro, KS» fungicide in growing common oak seedlings in open and protected ground .....	53
<b>Voytov D.Yu., Vasil'ev S.B., Kormilitsyn D.V.</b> Technology development for determining tree species using computer vision .....	60
<b>Gninenko Yu.I., Tsukanov Ya.V., Galich D.E., Cheplyanskiy I.Ya.</b> Chafer is a somewhat forgotten, but once again a real threat .....	67

## LANDSCAPE ARCHITECTURE

<b>Kireeva T.V., Vishnyakova E.N.</b> Embankments green spaces statutory regulation in modern Russia .....	75
---	----

## WOODWORKING AND CHEMICAL WOOD PROCESSING

<b>Ivankin A.N.</b> Chemical and biological degradation of phytogetic protein components .....	85
<b>Baskakov S.A., Baskakova Y.V., Kabachkov E.N., Kichigina G.A., Kushch P.P., Kiryukhin D.P., Krasnikova S.S., Badamshina E.R., Soldatenkov T.A., Vasilets V.N., Milovich F.O., Shulga Y.M.</b> Hydrophobization of cellulose spathellas obtained from Sosnowsky hogweed stem with solutions of tetrafluoroethylene telomers .....	95
<b>Evdokimov Yu.M., Sulimenko V.A., Meshcheryakov A.V., Russkikh D.V.</b> The history of the creation of electroadhesive joints .....	107
<b>Seregin N.G., Zaprudnov V.I.</b> Mechanical activation method for obtaining cement-ground piles binder .....	114
<b>Talipova M.V., Lyang A.V., Shcherbak N.V.</b> Development of filter-sorbing materials for modern gas masks and respirators .....	121
<b>Prokof'ev G.F., Kovalenko O.L.</b> Frequency determination of band saw teeth grinding (regrinding) .....	134

## FOREST ENGINEERING

<b>Sokolov A.P., Seliverstov A.A., Sukhanov Yu.V., Sen'kin V.A.</b> Ergonomic evaluation of forestry crane partial automation system .....	139
---	-----

## РОСТ ТУИ ЗАПАДНОЙ (*THUJA OCCIDENTALIS* L.) В ДЕНДРАРИИ ГЛАВНОГО БОТАНИЧЕСКОГО САДА ИМ. Н.В. ЦИЦИНА РАН ПО ДАННЫМ ДЕНДРОХРОНОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Д.Е. Румянцев<sup>1</sup>✉, С.Л. Рысин<sup>2</sup>, А.А. Коженкова<sup>2</sup>,  
П.С. Александров<sup>1</sup>, Н.С. Воробьева<sup>1</sup>, А.А. Епишков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Мытищинский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», 141005, Россия, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1  
<sup>2</sup>ФГУБН «Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина Российской академии наук», 127276, Москва, ул. Ботаническая д. 4

dendro15@list.ru

Представлены материалы исследования изменчивости радиального прироста (ширины годичного кольца) туи западной (*Thuja occidentalis* L.), в дендрарии Главного ботанического сада им. Н.В. Цицина РАН. Установлены основные закономерности кратковременной и долговременной изменчивости радиального прироста, выявлены особенности влияния метеорологических параметров на величину прироста. Составлена таблица хода роста деревьев по диаметру ствола. Даны рекомендации по уходу за растениями на основании результатов дендроклиматического анализа. Проведено сопоставление результатов дендроклиматического анализа с результатами аналогичных исследований роста туи в дендрарии Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Ключевые слова:** туя западная, годичные кольца, радиальный прирост, дендрохронология, дендроклиматология, Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН

**Ссылка для цитирования:** Румянцев Д.Е., Рысин С.Л., Коженкова А.А., Александров П.С., Воробьева Н.С., Епишков А.А. Рост туи западной (*Thuja occidentalis* L.) в дендрарии Главного ботанического сада им. Н.В. Цицина РАН по данным дендрохронологического анализа // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 1. С. 5–16. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-5-16

Древесные растения адаптированы к климатическим условиям ареала произрастания, характеру смены погодных условий в течение года, а также к отклонениям метеопараметров от средних многолетних значений. В пределе, к которому стремится адаптированность деревьев в естественном ареале произрастания, для генотипа конкретного вида (экоотипа), ежегодные колебания метеопараметров не должны оказывать существенного влияния на изменчивость ширины годичного кольца.

Интродуцированные древесные растения, оказавшиеся в нехарактерных условиях произрастания, в ответ на ежегодные изменения климатических факторов так или иначе будут демонстрировать чувствительность в реакции своего радиального прироста.

Эта чувствительность особенно увеличивается в урбанизированной среде, поскольку городские условия резко отличаются от природных. В первую очередь это техногенное загрязнение атмосферного воздуха и почв от негативных выбросов автотранспорта и промышленности. К числу иных факторов относятся следующие:

– антропогенная трансформация климата и микроклимата;

- изменение водного и воздушного режимов почв,
- световое и тепловое загрязнение;
- иная структура биотических связей в урбоэкосистеме по сравнению с естественной экосистемой;
- эволюционно новые варианты межвидовой конкуренции;
- механические повреждения надземной и подземной частей растений, возникающие при прокладке различных коммуникаций;
- уплотнение и трансформация структуры почв в результате перемешивания их горизонтов;
- специфичный режим ухода за деревьями, который может включать в себя обрезку, полив, борьбу с болезнями и вредителями, внесение удобрений и др.

Исследования изменчивости годичного радиального прироста древесных растений, произрастающих в урбанизированной среде, можно отнести к сложным по следующим причинам. Урбанизация не представляет собой единое явление, а варьирует по составу формирующих ее факторов и интенсивности их воздействия. Важно также, что динамика ширины годичных колец выступает как функция большого числа переменных в виде разнообразных факторов среды и при этом объем рассматриваемых факторов не стабилен

во времени. К тому же при совместном действии экологических факторов проявляются эффекты синергизма, аддитивности и антагонизма. Чем больше факторов значимо для существования растения, тем более сложные функциональные связи формируются при их взаимодействии.

Можно с большой степенью уверенности предположить, что рост интродуцированных древесных растений при культивировании в урбанизированной среде будет существенно отличаться от их роста в естественном ареале. Характер и степень этих различий требуют для своего понимания проведения специальных исследований и не могут быть установлены умозрительно.

### Цель работы

Цель работы — выявление закономерностей изменчивости ширины годичных колец туи западной (*Thuja occidentalis* L.), произрастающей в условиях северной части Москвы и установление индикационного значения показателей этой изменчивости.

Актуальность выполненных исследований обусловлена возможностью на объективной основе по дендрохронологической информации выявить факторы, критически значимые для нормального протекания физиологических процессов в организме дерева, а также ретроспективно исследовать закономерности роста древесных растений на длительных временных интервалах. Последнее особенно важно для видов-интродуцентов, результаты наблюдений за которыми не имеют требуемой полноты, в отличие от наблюдений за автохтонными видами.

Научная новизна проведенных исследований влияния климатических факторов на рост многих видов интродуцированных древесных растений с использованием методов дендрохронологии в условиях Московского региона определяется отсутствием подобных работ до настоящего времени. Нет данных и для туи западной, несмотря на то что этот вид широко используется при создании декоративных посадок в Москве и населенных пунктах Московской обл.

Практическая значимость результатов исследований связана с использованием выполненной диагностики при разработке рекомендаций по уходу за зелеными насаждениями, оценке кислородпродуцирующей функции туи западной в зависимости от погодного режима вегетационного сезона.

Еще один аспект практической значимости выполненных работ — выявление возможностей более широкого использования туи западной для создания посадок различного функционального назначения. Несмотря на то что туя западная весьма популярна в декоративном озеленении, лесные

культуры этого вида в хозяйственно важном масштабе на территории России не создавались [1, 2]. С учетом тенденции потепления климата, сопровождающихся ростом числа засух и их продолжительности в течение вегетационного сезона [3] можно спрогнозировать ситуацию, когда туя окажется одним из видов древесных растений, весьма перспективным для плантационного лесоразведения в целях получения древесины.

Туя западная достаточно хорошо исследована в дендрохронологическом отношении в естественном ареале произрастания, а потому данные о ее росте при интродукции в разные регионы России сформировали базу для сравнительного анализа [4–7].

### Объект исследований

Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина Российской академии наук (ГБС РАН) находится на территории Северо-Восточного административного округа Москвы. Природно-географические особенности территории описаны в монографии сотрудников ГБС РАН, обобщающей итоги многолетних дендрологических исследований [1]. Коллекция древесных растений занимает центральную часть ГБС РАН — восточный склон моренного плато, сложенного красно-бурыми валунными суглинками. Рельеф выровненный, с небольшим наклоном к руслу р. Лихоборка. Гидрологические условия территории характеризуются наличием трех водоносных горизонтов. Основной горизонт расположен на глубине 2...6 м в песчаных и супесчаных отложениях.



Рис. 1. Общий вид посадки туи западной  
Fig. 1. General view of the White cedar planting

Дендрарий ГБС РАН располагается в пределах обширного зеленого массива, поэтому микроклиматические условия здесь несколько отличаются от застроенной части города. Дата перехода среднесуточной температуры через отметку в 0 °С для весны — 5 мая, осени — 5 октября, безморозный

## Характеристика учетных деревьев

## Characteristics of accounting trees

Номер учетного дерева	Высота, м	Диаметр ствола на высоте 1,3 м	Класс роста	Категория состояния	Расчетный возраст, лет	Число колец на керне	Географические координаты	
							широта	долгота
1	10	16	III	1	53	48	N 55°50.501'	E 037°36.745'
2	12	21	II	1	51	41	N 55°50.529'	E 037°36.715'
3	14	18	I	1	64	55	N 55°50.529'	E 037°36.724'
4	12	16	II	1	62	54	N 55°50.527'	E 037°36.687'
5	14	18	I	1	61	51	N 55°50.535'	E 037°36.719'
6	14	17	I	1	64	54	N 55°50.537'	E 037°36.719'
7	15	18	I	1	60	49	N 55°50.539'	E 037°36.714'
8	15	24	I	1	67	59	N 55°50.535'	E 037°36.721'
9	14	22	I	1	59	50	N 55°50.543'	E 037°36.709'
10	13	20	II	1	56	45	N 55°50.548'	E 037°36.717'
11	12	20	II	1	51	42	N 55°50.545'	E 037°36.711'
12	14	23	I	1	66	55	N 55°50.552'	E 037°36.717'
Среднее значение	13	19	I.5	1	60	50		

период длится 214 сут. Переход через отметку в 5 °С, условно принимаемый за начало вегетационного периода, наблюдается весной 20 апреля, а его окончание осенью 10 октября. Продолжительность вегетационного периода составляет 173 сут. Среднегодовая температура воздуха составляет 3,7 °С, абсолютный минимум –40,8 °С, абсолютный максимум 35,8 °С. Первый осенний заморозок отмечен в среднем 20 сентября, последний весенний — 20 мая. Среднегодовое количество осадков 537 мм. Почвы дендрария дерново-среднеподзолистые суглинистые с рН 5,1.

Обследованное нами насаждение туи западной — это часть экспозиции вида, представленного в дендрарии ГБС РАН (рис. 1). Ранее посадка стала объектом исследований А.В. Котовой [8]. Исследователь, в частности, показал, регулярное повреждение насаждения навалами снега. Согласно данным многолетних фенологических наблюдений, вегетация туи начинается примерно 5 мая, пыление проходит с 21 по 27 мая.

## Материалы и методы

Взятие образцов древесины выполнено при помощи бурава Пресслера с деревьев I–III класса роста по Крафту. Отбор проведен на высоте 1,3 м по произвольно взятому радиусу. Характеристика обследованных учетных деревьев приведена в табл. 1, процесс отбора изображен на рис. 2.

По данным табл. 1 видно, что средняя высота обследованных деревьев составляет 13 м при среднем диаметре ствола 19 см. Все они характеризуются хорошим санитарным состоянием (балл 1,0), признаки развития болезней и вредителей на деревьях не обнаружены.



Рис. 2. Отбор кернов  
Fig. 2. Core sampling

Отобранные в полевых условиях образцы этикетировались и поступали для обработки в лабораторию дендрохронологии Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Измерения ширины годичных колец производились на предварительно подготовленных кернах производились в полуавтоматическом режиме при помощи прибора LINTAB.

Контроль правильности измерений осуществлялся путем перекрестной датировки каждой индивидуальной древесно-кольцевой хронологии и средней хронологии по пробной площади в программе TSAP-Win [9, 10]. Полученные результаты с помощью программы TSAP-Win сохранялись в виде файла в формате «Excel CSV». Статистическая обработка данных была проведена при помощи программы MS Excel.

В изменчивости временного ряда радиального прироста посредством математических преобразований можно выделить долговременную и кратковременную компоненты этого показателя. Долговременная компонента отражает влияние на прирост медленно изменяющихся экологических факторов, к числу которых относятся конкурентные отношения в фитоценозе, а также эффекты изменения скорости нарастания древесины, обусловленные увеличением возраста дерева (вызванные изменением концентрации фитогормонов в отдельно взятой на стволе точке камбиальных делений). Кратковременная компонента отражает, прежде всего, влияние на ширину годичного кольца ежегодно изменяющихся климатических параметров.

Для выделения кратковременной компоненты нами проведен расчет временных рядов индексов радиального прироста по формуле:

$$I = \frac{R}{T},$$

где  $I$  — значение индекса прироста в данном году;

$R$  — значение радиального прироста (ширины годичного кольца) в данном году, мм;

$T$  — скользящее среднее для определенного временного интервала, мм.

В зависимости от варианта расчета скользящей средней индекс будет различаться. В данном случае скользящее среднее  $T$  для года  $n$  рассчитывалось по формуле

$$T_n = \frac{R_{n-4} + R_{n-3} + R_{n-2} + R_{n-1} + R_n}{5},$$

где  $R_n$  — значение ширины годичного кольца в текущем году, мм;

$R_{n-1}$  — значение ширины годичного кольца в предыдущем году, мм и т. д.

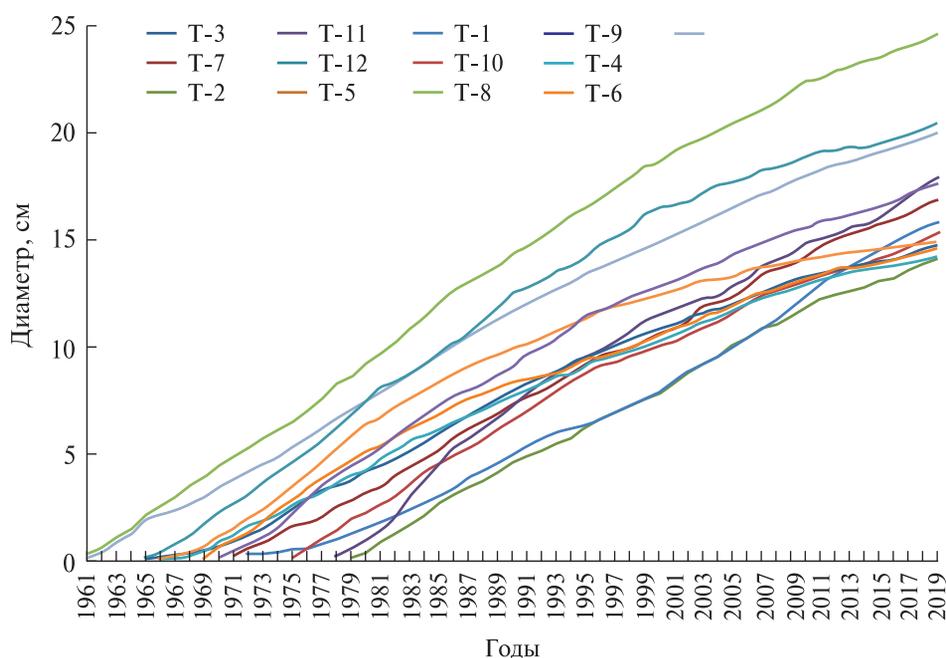
Для выявления сопряженности в колебаниях ширины годичного кольца нами был использован метод корреляционного анализа рядов индексов прироста и рядов метеопараметров. Достоверность коэффициента корреляции определяется длиной временного ряда и принятым уровнем доверительной вероятности. В биологических исследованиях общепринятым уровнем доверительной вероятности является 0,95 [11]. Это означает, что полученные с использованием данного порога доверительной вероятности результаты будут достоверны в 95 % случаев.

## Результаты исследований

Использование дендрохронологической информации предоставляет возможность оценки возраста деревьев. В табл. 1 приведены данные о числе годичных колец, зафиксированных на кернах, которые были получены при бурении отдельных учетных деревьев. Установлено, что число годичных колец изменяется в пределах 41...59 на одном керне. Эти данные позволяют судить о возрасте учетных деревьев с формулировкой «не менее чем». Например, возраст учетного дерева № 8 составляет не менее 59 лет. Можно предположить, что на самом деле этот возраст больше на несколько лет, так как керн отбирался на высоте 1,3 м, до которой дерево должно было несколько лет расти. Литературные данные свидетельствуют, о том, что насаждение туи в дендрарии ГБС РАН было создано в 1950-х гг. [1]. Следует отметить, что насаждение сформировано посадкой, к моменту которой посадочный материал уже имел определенный (хотя и небольшой) биологический возраст. Таким образом, установленный нами на основе анализа годичных колец возраст совпадает с данными литературных источников. Важно, что, хотя насаждение и является одновозрастным, тем не менее, на кернах с разных учетных деревьев зафиксировали разное число годичных колец. Это расхождение невелико (коэффициент вариации 6 %) и связано с невозможностью направить бур Пресслера таким образом, чтобы при отборе керна он прошел через биологический центр ствола дерева.

Анализ полученных данных позволяет провести ретроспективную реконструкцию роста дерева по диаметру стволов для учетных деревьев. Зная диаметр дерева в год  $N$  и последовательно вычитая из величины этого показателя двойную ширину годичного кольца (радиальный прирост, умноженный на 2, дает годичный прирост по диаметру) для прошлого года, позапрошлого года и так далее, можно получить ряды хода роста учетных деревьев по диаметру ствола на высоте 1,3 м (рис. 3).

Анализируя графики рядов хода роста (см. рис. 3), можно отметить различную скорость роста отдельных учетных деревьев. Максимальной



**Рис. 3.** Реконструированный ход роста по диаметру для учета деревьев туи западной в дендрарии ГБС РАН

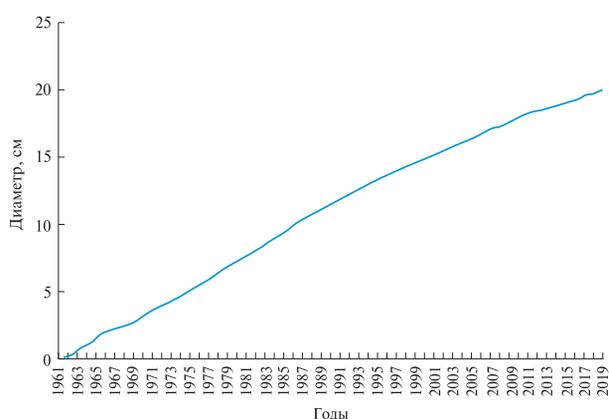
**Fig. 3.** Reconstructed growth by diameter for white cedar inventory in the GBS RAS arboretum

скоростью роста отличается учетное дерево Т-2, минимальной — характеризуются учетные деревья Т-8 и Т-9. Среднюю для всех изученных деревьев скорость роста по диаметру отражает график на рис. 4.

График, представленный на рис. 4 можно использовать при прогнозировании хода роста туи западной в насаждениях различного функционального назначения (в том числе на объектах озеленения). Это важно для моделирования изменения пропорций создаваемых композиций.

Дендрохронологический метод позволяет выявлять основные климатические факторы, способные вызывать ослабление роста деревьев в конкретном древостое [12]. По рис. 5. видно, что изменчивость ширины годичного кольца обладает выраженным возрастным трендом: с возрастом ширина годичного кольца снижается.

На рис. 5 хорошо видно, что ширина годичного кольца меняется от года к году, причем в ряде случаев эти колебания весьма значительны. Амплитуду колебаний прироста отражает рис. 6. Числовые значения, легшие в основу графика — это разность между шириной годичного кольца в год  $n - 1$  и шириной годичного кольца в год  $n$ . Анализируя рис. 6, можно отметить существование перепадов прироста: так резкое увеличение ширины годичного кольца наблюдалось в 1965, 1980 и в 2004 гг. Фактически эти годы характеризуют наиболее резкие переходы от «плохого» состояния растений к «хорошему». На графике динамики ширины годичного кольца (см. рис. 6)



**Рис. 4.** Обобщенный график хода роста по диаметру туи западной в условиях дендрария ГБС РАН

**Fig. 4.** General growth graph of the white cedar diameter in the GBS RAS arboretum

им предшествуют 1964, 1979 и 2003 гг., характеризующиеся крайне узкими годичными кольцами. Анализ факторов формирования резких перепадов в ширине годичного кольца целесообразно провести по методу климаграмм [13, 14].

Анализируя климаграммы, представленные на рис. 7, следует отметить, что для 1965, 1980 и 2004 гг. наблюдается специфическое отличие по параметру «среднемесячная температура мая». Низкая температура в мае стимулирует лучший рост туи. О низкой жаростойкости вида свидетельствует плохой рост его представителей в годы с высокой температурой.

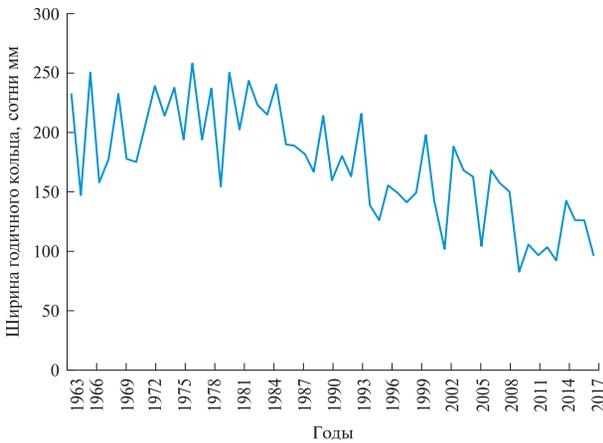


Рис. 5. Динамика средней ширины годичного кольца в древостое туи западной по годам

Fig. 5. Average width of the white cedar annual ring dynamics by the years

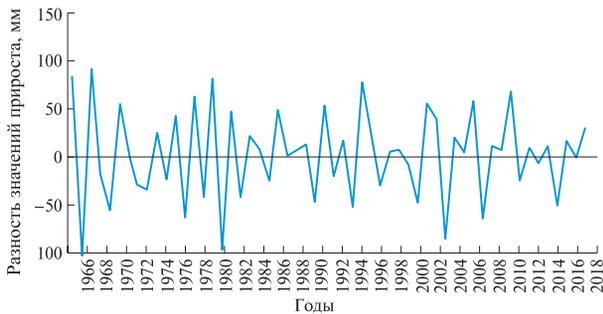


Рис. 6. Динамика амплитуды колебаний радиального прироста туи западной

Fig. 6. Radial growth fluctuation amplitude dynamics

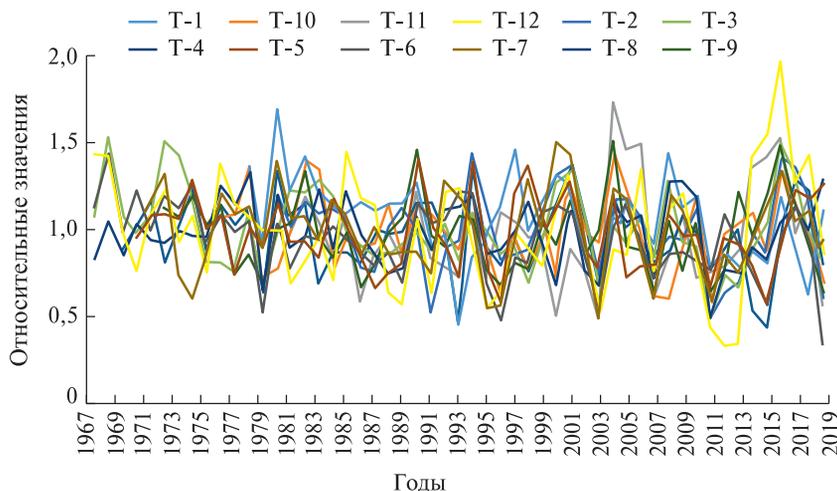


Рис. 9. Динамика индексов радиального прироста у учетных деревьев туи

Fig. 9. Radial growth indices dynamics in the accounting thuja trees

Анализируя климаграммы на рис. 8, необходимо отметить, что для трех выявленных лет наблюдается выраженное специфическое отличие по параметру «месячная сумма осадков июля». Обилие осадков в это период положительно ска-

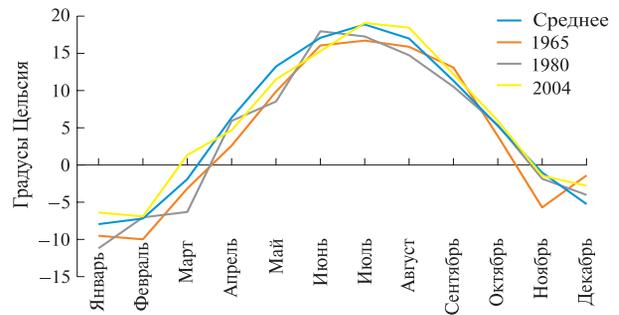


Рис. 7. Распределение среднемесячных температур по месяцам в годы формирования экстремально узких годичных колец и по среднемноголетним данным

Fig. 7. Distribution of average monthly temperatures by months in the years of extremely narrow annual rings formation and by average long-term data

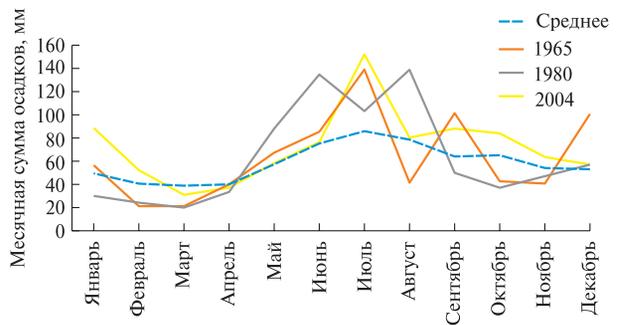


Рис. 8. Распределение сумм осадков по месяцам в годы формирования экстремально узких годичных колец и по среднемноголетним данным

Fig. 8. Distribution of monthly precipitation amounts by months in the years of extremely narrow annual rings formation and according to long-term average data

зывается на росте туи. Следовательно, полив растений в июле (в том случае если наблюдается выпадение осадков ниже среднемноголетней нормы) приведет к более интенсивному росту по диаметру. Безусловно, в декоративных посадках

нет необходимости в увеличении скорости роста в целях накопления древесины. Однако интенсивный прирост по диаметру здесь важен для увеличения устойчивости и долговечности, так как обеспечивает скорейшее зарастание ран, остатков сухих сучьев, механических повреждений и снижает таким образом вероятность заражения грибными и бактериальными болезнями через эти образования.

Вывод, который можно сделать на основании изложенного выше, имеет практическое значение — назначение полива туи должно быть предварительно дендроклиматически диагностировано и только тогда есть смысл его проводить, причем в определенный период вегетационного сезона и с учетом текущих значений метеопараметров.

Альтернативным методом климаграмм по структуре анализа влияния метеофакторов факторов на прирост является метод корреляционного анализа. Для его выполнения необходимо предварительно провести индексирование временных рядов ширины годичного кольца. Ширину годичного кольца каждого года следует поделить на среднюю ширину годичного кольца за последние 5 лет, в результате чего будут получены индексированные хронологии по ширине годичного кольца (рис. 9).

Индивидуальные индексированные хронологии характеризуются высокой синхронностью: периоды увеличения и уменьшения прироста у них совпадают (см. рис. 9). На основе индивидуальных хронологий была рассчитана средняя индексированная хронология (рис. 10).

Представленная хронология (см. рис. 10) легла в основу корреляционного анализа. Достоверность коэффициентов корреляции определяется длиной временного ряда. При числе степеней свободы 54 и уровне доверительной вероятности 0,05 достоверны значения коэффициентов корреляции от 0,26 (в табл. 2 они выделены полужирным шрифтом). Достоверные значения коэффициента корреляции для температур сентября — это случайность, уровень доверительной вероятности 0,05 подразумевает, что 5 % из выявленных коэффициентов будут иметь случайный характер и в первую очередь это относится к коэффициентам, значение которых близко к пороговому (в нашем случае 0,26).

Четко выражен (см. табл. 2) отрицательный эффект майских засух в год формирования годичного кольца: наблюдается отрицательная реакция ширины годичного кольца на повышенные температуры атмосферного воздуха и положительная — на повышенные суммы осадков. Недостаток осадков в июле в год, предшествующий году формирования годичного кольца, имеет отрицательное влияние на прирост, напротив, обилие осадков сказывается на нем положительно.

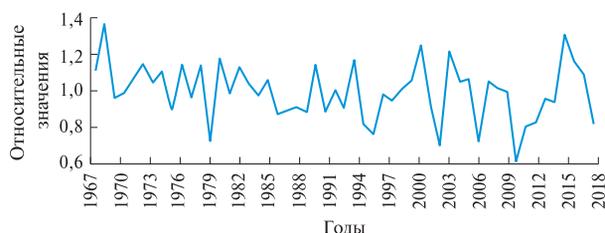


Рис. 10. Динамика индексов радиального прироста в исследованном древостое

Fig. 10. Radial growth indices dynamics in the studied forest stand

Т а б л и ц а 2

### Значения коэффициентов корреляции между индексами радиального прироста и метеопараметрами

#### Correlation coefficient values between radial growth indices and meteorological parameters

Месяц	Год, предшествующий году формирования годичного кольца		Год формирования годичного кольца	
	температура	осадки	температура	осадки
Январь	0,08	0,20	-0,21	0,00
Февраль	0,16	-0,15	0,06	0,15
Март	0,11	0,06	-0,02	0,14
Апрель	0,05	0,13	0,08	0,09
Май	0,15	-0,03	<b>-0,53</b>	<b>0,33</b>
Июнь	-0,09	0,10	-0,25	0,01
Июль	-0,23	<b>0,39</b>	-0,15	0,22
Август	-0,15	0,21	0,03	0,08
Сентябрь	-0,13	0,02	0,02	<b>-0,28</b>
Октябрь	0,12	-0,17	-0,17	0,09
Ноябрь	-0,11	-0,03	-0,07	0,06
Декабрь	0,31	0,29	-0,06	0,02

Таким образом, и корреляционный анализ, и анализ по методу климаграмм выявили критическую значимость метеоусловий мая и июля для формирования прироста древесины у туи западной в условиях дендрария ГБС РАН. Однако указанные методы фиксируют несколько разные экофизиологические аспекты реакции деревьев на изменения значений метеопараметров в эти месяцы. Практическое значение для улучшения роста посадок туи может иметь полив в мае и июле с учетом текущих метеоусловий и сравнения данных погодного мониторинга метеопараметров с данными по среднелетним показателям.

### Результаты и обсуждение

Очевиден смысл сопоставления полученных нами материалов с результатами аналогичных исследований.

Так при изучении туи западной, произрастающей в дендрарии Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана [15], были выявлены следующие достоверные коэффициенты корреляции с индексами прироста:

- осадки мая текущего года ( $R = 0,45$ );
- температура марта прошлого года ( $R = -0,41$ );
- температура июля прошлого года ( $R = -0,44$ );
- температура октября прошлого года и индекс радиального прироста ( $R = 0,41$ );
- осадки июля прошлого года ( $R = 0,45$ );
- осадки сентября прошлого года ( $R = 0,38$ ).

Расчитанные значения коэффициентов корреляции для перечисленных показателей свидетельствуют о достаточно тесной их связи с индексами прироста.

Следует отметить, что для формирования годичного кольца туи в дендрарии оказался значимым только один параметр текущего года (календарного года формирования годичного кольца) — осадки мая (также как и в условиях ГБС РАН). Увеличение их количества положительно сказывалось на величине радиального прироста.

Остальные значимые метеопараметры приурочены к прошлому году (году предшествовавшему календарному году формирования годичного кольца). Установлено, что так же, как и в ГБС РАН, обильные осадки в июле прошлого года положительно влияют на величину радиального прироста на следующий год.

Таким образом, генетические особенности вида в данном случае оказываются более значимы, нежели локальные экологические условия произрастания, и формируют одинаковую реакцию прироста на увеличение осадков мая текущего года и осадков июля прошлого года.

Для сравнения можно привести аналогичные результаты анализа роста псевдотсуги Мензиса (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) из дендрария Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана — североамериканского вида хвойных, имеющего ареал, не перекрывающийся с ареалом туи западной [16]. Достоверные значения коэффициентов корреляции были обнаружены в следующих случаях: между индексом радиального прироста и месячной суммой осадков июня ( $R = 0,43$ ), суммой осадков ноября ( $R = -0,47$ ); среднемесячной температурой июня ( $R = -0,46$ ), июля ( $R = -0,57$ ), августа ( $R = -0,43$ ); среднемесячной температурой сентября ( $R = -0,48$ ). Для метеопараметров в год, предшествовавший году формирования годичного кольца, достоверные значения коэффициентов корреляции были обнаружены между осадками декабря и индексом прироста по ширине годичного кольца ( $R = -0,45$ ).

Сопоставление набора достоверных коэффициентов корреляции для двух видов на двух разных объектах демонстрирует их полное несоответствие. Общей является значимость условий июля — отрицательное влияние засушливых условий на рост обеих пород. Однако характер этого влияния: в текущий вегетационный сезон, либо вегетационный сезон прошлого года, положительная реакция на увеличение атмосферных осадков либо отрицательная реакция на повышенные температуры — отличается по экофизиологическим деталям. Из этого можно сделать вывод о важности наследственных экологических свойств вида при формировании спектра климатических факторов, критически значимых для существования деревьев в разных экотопах и о перспективности дендроклиматического анализа для диагностики потребности деревьев в определенном роде уходах (прежде всего поливах).

В рамках выполненного исследования несомненный интерес представляет сопоставление результатов с данными аналогичных исследований в естественном ареале.

Так, для северо-востока штата Миннесота (США) были построены хронологии по ширине годичного кольца для сосны смолистой (*Pinus resinosa* Ait.), сосны веймутовой (*Pinus strobus* L.) и туи западной (*Thuja occidentalis* L.) [6]. Реакция ширины кольца на климат, оцененная с помощью корреляционного анализа и функций отклика, была в целом сходной у всех трех видов с достоверными положительными связями с июньско-июльскими осадками и значимыми отрицательными ассоциациями с июньско-июльскими температурами воздуха. При этом для роста туи западной (по сравнению с двумя другими видами) более значимы погодные условия весны. Таким образом, отмечается явное сходство с полученными нами результатами для дендрариев ГБС РАН и Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Живые и мертвые деревья туи западной были исследованы дендрохронологическим методом в условиях произрастания на склонах скал и в осыпях Ниагарского откоса в южной части провинции Онтарио (Канада) [5]. Сто сорок две серии годичных колец были перекрестно датированы, и в итоге составлена хронология древесных колец длиной 1397 лет, охватывающая период 594–1990 гг. нашей эры (самая длинная в Канаде). Расчет корреляции между индексами прироста древесных колец и 51 климатической переменной показал, что рост туи западной отрицательно коррелирует с температурой предыдущего вегетационного периода. Наиболее сильная корреляция наблюдалась между радиальным ростом деревьев и максимальной температурой в июле-августе прошлого года. Чрезвычайно жаркие летние

условия негативно сказываются на росте деревьев в следующем году. Данные температурные корреляции очень похожи на наблюдавшиеся для туи и также сопоставимы с результатами, полученными в нашем исследовании.

Исследование изменчивости годовых колец туи в широтном градиенте было выполнено в западных районах Квебека [4]. Широтная трансекта была установлена с 47,3° с. ш. по 50° с. ш. и разделена на три зоны по обилию туи: сплошная зона (CZ), где туя распространена; прерывистая зона (DZ), которая отмечает северный край непрерывного распределения и где туя становится менее распространенной в лесном пологом; маргинальная зона (MZ), где встречаются только несколько изолированных участков с древостоями туи. Отбор проб был сосредоточен на слабодренированных низменных участках, так как они являются наиболее репрезентативными по эдафическим условиям произрастания на северной границе распространения вида в Квебеке. Современные данные свидетельствуют о том, что бореальные леса и тундра испытывают воздействие потепления климата. Одним из ожидаемых результатов прогнозируемых климатических изменений является смещение биогеографических ареалов видов деревьев на север. В бореальных экосистемах последствия изменения климата, как ожидается, будут наиболее заметны на северных границах распространения вида. Глобальное потепление должно ослабить связанные с холодом климатические ограничения, как это было предложено исследованиями, проведенными на высокоширотных линиях деревьев.

В рассматриваемом исследовании была проанализирована сеть ежегодных данных о приросте деревьев за несколько столетий в сочетании с метеорологическими данными, охватывающими период с 1953 по 2010 год.

Межгодовые колебания прироста туи в период с 1953 по 2010 г. положительно коррелировали с весенней температурой (март, апрель, в основном май). Однако при этом рост отрицательно коррелировал с теплыми летними (июль и август) температурами года, предшествовавшего образованию кольца. Отрицательная корреляция наблюдалась также для большинства пробных площадей с июньской температурой текущего года (календарного года формирования годичного кольца). Установлено, что высокая температура благоприятна для роста туи в начале вегетационного периода, но она становится ограничивающим фактором по мере продвижения к концу вегетационного сезона. Радиальный рост также положительно коррелировал с осадками в августе текущего года как в зоне CZ, так и в зоне DZ, но не в зоне MZ. Кроме того, избыток осадков в октябре

года, предшествующего году образования кольца, оказал негативное влияние на рост в зоне CZ. Негативное влияние осадков наблюдалось и в зоне MZ в мае текущего года.

Несколько иные результаты дало исследование роста туи на южной границе ареала. Это исследование было проведено в округе Рокингем, штат Вирджиния (США) [7]. Изучение стандартной хронологии выявило значимые корреляции между радиальным ростом туи и климатическими переменными. Связь между средней температурой и ростом была самой слабой среди всех климатических переменных, подвергавшихся анализу. Только средняя температура августа предыдущего года и температура июля текущего года достоверно коррелировали с ростом, демонстрируя отрицательную корреляцию. Связи между ростом туи и осадками были преимущественно положительными, причем осадки октября прошлого календарного года, текущие июньские, августовские и сентябрьские осадки достоверно положительно коррелировали с величиной прироста. В результатах данного исследования мы в очередной раз наблюдаем выраженное влияние погодной обстановки июля, но важно, что влияние условий мая в данном случае не проявляется.

## Выводы

Полученные в ходе исследования модели хода роста туи западной по диаметру можно использовать в практике ухода за деревьями в урбанизированной среде. По данным дендроклиматического анализа установлено, что на рост туи западной в дендрарии на территории ГБС РАН выраженное отрицательное влияние оказывают высокие температуры мая, положительное — осадки мая. Таким образом, майские засухи имеют критическое значение для успешного роста туи на исследованном объекте. Малое количество осадков в июле отрицательно сказывается на росте туи на следующий год, что следует учитывать при планировании агротехнических уходов за туей на следующий год. Анализ литературных данных показывает, что погодный режим мая и июля оказывает значимое влияние на рост туи и в естественном ареале, что свидетельствует об общем характере выявленной закономерности.

## Список литературы

- [1] Плотникова Л.С., Александрова М.С., Беляева Ю.Е., Немова Е.М., Рябова Н.В., Якушина Э.И. Древесные растения Главного ботанического сада им Н.В. Цицина РАН: 60 лет интродукции / под ред. А.С. Демидова. М.: Наука, 2005. 586 с.
- [2] Каппер О.Г. Хвойные породы. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1954. 304 с.

- [3] Засухи Восточно-Европейской равнины по гидрометеорологическим и дендрохронологическим данным / под ред. О.Н. Соломиной. СПб.: Нестор-История, 2017. 360 с.
- [4] Housset J., Girardin M., Baconnet M., Carcaillet C., Bergeron Y. Effect of climate on the radial growth of *Thuja occidentalis* northern marginal population in Quebec // *Tree Rings in Archeology, Climatology and Ecology*, 2015, v. 13, pp. 82–85.
- [5] Kelly P.E., Cook E.R., Larson D.W. A 1397-year tree-ring chronology of *Thuja occidentalis* from cliff faces of the Niagara Escarpment, southern Ontario, Canada // *Canadian J. of Forest Research*, 1994, v. 24, no. 5, pp. 1049–1057. DOI:10.1139/X94-137
- [6] Kipfmüller K.F., Elliot G.P., Larson E.R. An assessment of dendroclimatic potential of three conifer species in Northern Minnesota // *Tree-ring research*, 2010, v. 66 (2), pp. 113–126.
- [7] Kincaid J.A. Structure and dendroecology of *Thuja occidentalis* in disjunct stand south of its contiguous range in the Central Appalachian Mountains, USA // *Forest ecosystems*, 2016, v. 25, no. 3, pp. 1–11.
- [8] Колесников А.И. Декоративная дендрология. М.: Лесная пром-сть, 1974. 703 с.
- [9] Матвеев С.М., Румянцев Д.Е. Дендрохронология. Воронеж: Изд-во ВГЛУ, 2013. 140 с.
- [10] Румянцев Д.Е. История и методология лесоводственной дендрохронологии. М.: МГУЛ, 2010. 107 с.
- [11] Лакин Г.Ф. Биометрия. М.: Высшая школа, 1973. 343 с.
- [12] Fritts H.C. *Tree rings and climate*. London–New York–San Francisco: Academic press, 1976, 576 p.
- [13] Румянцев Д.Е. Потенциал использования дендрохронологической информации в лесной науке и практике: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Воронеж: Изд-во ВГЛТА, 2011, 36 с.
- [14] Lovelius N.V. *Dendroindication of natural processes and antropogenic influences*. St. Petersburg: World & family-95, 1997, 316 p.
- [15] Румянцев Д.Е., Воробьева Н.С., Александров П.С. Особенности роста туи западной в дендрарии МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана // *Academy*, 2019, № 4 (43). С. 4–6.
- [16] Румянцев Д.Е., Денисова Н.Б., Воробьева Н.С., Александров П.С. Дендроклиматический анализ роста псевдотсуги Мензиса в условиях дендрария МФ МГТУ им. Баумана // *Современные проблемы науки и образования*. Материалы науч. конф. М.: Изд-во РАЕ, 2019. С. 39–41.
- [17] Котова А.В. Разработка методики эстетической оценки и прогноз состояния насаждений в ботанических экспозициях (на примере экспозиций дендрария ГБС РАН) // *Лесное хозяйство*, 2010. № 5. С. 72.
- [18] Румянцев Д.Е., Черакшев А.В. Дендроклиматическая диагностика состояния сосен секции STROBI в условиях дендрологического сада МГУЛ // *Вестник МГУЛ – Лесной вестник*, 2013. № 7 (99). С. 121–127.
- [19] Румянцев Д.Е. Дендроклиматические исследования и лесоведение // *Материалы VIII Междунар. науч. конф. «Проблемы природопользования и экологическая ситуация в Европейской России и на сопредельных территориях»*, Белгород, 22–25 октября 2019 г. Белгород: Изд-во БГУ, 2019. С. 58–61.

## Сведения об авторах

**Румянцев Денис Евгеньевич**  — д-р биол. наук, профессор кафедры лесоводства, экологии и защиты леса МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), dendro15@list.ru

**Рысин Сергей Львович** — канд. биол. наук, вед. науч. сотр. лаборатории дендрологии Главного ботанического сада им. Н.В. Цицина РАН, ser-gysin@yandex.ru

**Коженкова Анна Альбертовна** — канд. с.-х. наук, науч. сотр. лаборатории дендрологии Главного ботанического сада им. Н.В. Цицина РАН, kozhenkova\_anna@mail.ru

**Александров Павел Сергеевич** — магистрант кафедры ландшафтной архитектуры и садово-паркового строительства МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), pavel\_aleksandrov\_95@mail.ru

**Воробьева Наталия Сергеевна** — аспирант кафедры лесоводства экологии и защиты леса МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), vorobyeva@bmstu.ru

**Епишков Антон Алексеевич** — аспирант кафедры лесоводства экологии и защиты леса МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), kam\_ant1983@mail.ru

Поступила в редакцию 02.03.2022.

Одобрено после рецензирования 13.10.2022.

Принята к публикации 12.12.2022.

# WHITE CEDAR GROWTH IN THE N.V. TSITSIN MAIN BOTANICAL GARDEN ARBORETUM OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES ACCORDING TO DENDROCHRONOLOGICAL ANALYSIS

D.E. Rumyantsev<sup>1✉</sup>, S.L. Rysin<sup>2</sup>, A.A. Kozhenkova<sup>2</sup>,  
P.S. Aleksandrov<sup>1</sup>, N.S. Vorob'eva<sup>1</sup>, A.A. Epishkov<sup>1</sup>

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

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

dendro15@list.ru

The study materials of the White cedar (*Thuja occidentalis* L.) radial growth (the width of the annual ring) variability in the N.V. Tsitsin Main Botanical Garden arboretum of the Russian Academy of Sciences are presented. The main patterns of short-term and long-term variability of radial growth are established, the influence peculiarities of meteorological parameters on the growth figures are revealed, a yield table of tree growth by trunk diameter is compiled. Based on the results of dendroclimatic analysis, recommendations for the care of plants are given. The results of dendroclimatic analysis were compared with the results of similar studies of White Cedar growth in the Mytishchi branch of the Bauman Moscow State Technical University arboretum.

**Keywords:** white cedar, annual rings, radial growth, dendrochronology, dendroclimatology, the N.V. Tsitsin Main Botanical Garden RAS

**Suggested citation:** Rumyantsev D.E., Rysin S.L., Kozhenkova A.A., Aleksandrov P.S., Vorob'eva N.S., Epishkov A.A. *Rost tui zapadnoy (Thuja Occidentalis L.) v dendrarii Glavnogo botanicheskogo sada im. N.V. Tsitsina RAN po dannym dendrokronologicheskogo analiza* [White cedar growth in the N.V. Tsitsin Main Botanical Garden arboretum of Russian Academy Of Sciences according to dendrochronological analysis]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 1, pp. 5–16. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-5-16

## References

- [1] Plotnikova L.S., Aleksandrova M.S., Belyaeva Yu.E., Nemova E.M., Ryabova N.V., Yakushina E.I. *Drevesnye rasteniya Glavnogo botanicheskogo sada im N.V. Tsitsina RAN: 60 let introduksii* [Woody plants of the Main Botanical Garden of the USSR Academy of Sciences]. Ed. A.S. Demidov. Moscow: Nauka, 1975, 547 p.
- [2] Kapper O.G. *Khvoynye porody* [Coniferous species]. Moscow-Leningrad: Goslesbumizdat, 1954, 304 p.
- [3] *Zasukhi Vostochno-Evropeyskoy ravniny po gidrometeo-rogicheskim i dendrokronologicheskim dannym* [Droughts of the East European plain according to hydrometeorological and dendrochronological data]. Ed. O.N. Solomina. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2017, 360 p.
- [4] Housset J., Girardin M., Baconnet M., Carcaillet C., Bergeron Y. Effect of climate on the radial growth of *Thuja occidentalis* northern marginal population in Quebec. *Tree Rings in Archeology, Climatology and Ecology*, 2015, v. 13, pp. 82–85.
- [5] Kelly P.E., Cook E.R., Larson D.W. A 1397-year tree-ring chronology of *Thuja occidentalis* from cliff faces of the Niagara Escarpment, southern Ontario, Canada. *Canadian J. of Forest Research*, 1994, v. 24, no. 5, pp. 1049–1057. DOI:10.1139/X94-137
- [6] Kipfmüller K.F., Elliot G.P., Larson E.R. An assessment of dendroclimatic potential of three conifer species in Northern Minnesota. *Tree-ring research*, 2010, v. 66 (2), p. 113–126.
- [7] Kincaid J.A. Structure and dendroecology of *Thuja occidentalis* in disjunct stand south of its contiguous range in the Central Appalachian Mountains, USA. *Forest ecosystems*, 2016, v. 25, no. 3, pp. 1–11.
- [8] Kolesnikov A.I. *Dekorativnaya dendrologiya* [Decorative dendrology]. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1974, 703 p.
- [9] Matveev S.M., Rumyantsev D.E. *Dendrokronologiya* [Dendrochronology]. Voronezh: VGLTU, 2013, 140 p.
- [10] Rumyantsev D.E. *Istoriya i metodologiya lesovodstvennoy dendrokronologii* [History and methodology of forestry dendrochronology]. Moscow: MGUL, 2010, 107 p.
- [11] Lakin G.F. *Biometriya* [Biometrics]. Moscow: Vysshaya shkola, 1973, 343 p.
- [12] Fritts H.C. *Tree rings and climate*. London–New York–San Francisco: Academic press, 1976, 576 p.
- [13] Rumyantsev D.E. *Potentsial ispol'zovaniya dendrokronologicheskoy informatsii v lesnoy nauke i praktike* [Potential use of dendrochronological information in forest science and practice]. Diss. Dr. Sci. (Biol.). Voronezh: VGLTA, 2011, 36 p.
- [14] Lovelius N.V. Dendroindication of natural processes and antropogenic influences. St. Petersburg: World & family-95, 1997, 316 p.
- [15] Rumyantsev D.E., Vorob'eva N.S., Aleksandrov P.S. *Osobennosti rosta tui zapadnoy v dendrarii MF MGTU im. N.E. Bauman* [Features of the growth of Western thuja in the arboretum of the Moscow State Technical University named after N.E. Bauman]. *Academy*, 2019, no. 4 (43), pp. 4–6.
- [16] Rumyantsev D.E., Denisova N.B., Vorob'eva N.S., Aleksandrov P.S. *Dendroklimaticheskij analiz rosta psevdotsugi Menzisa v usloviyakh dendrariya MF MGTU im. Bauman* [Dendroclimatic analysis of the growth of Menzies pseudotsuga in the conditions of the arboretum of the Bauman Moscow State Technical University]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. Materialy nauchnykh konferentsiy* [Modern problems of science and education. Materials of scientific conferences]. Moscow: RAE, 2019, pp. 39–41.
- [17] Kotova A.V. *Razrabotka metodiki esteticheskoy otsenki i prognoz sostoyaniya nasazhdeniy v botanicheskikh ekspozitsiyakh (na primere ekspozitsiy dendrariya GBS RAN)* [Discussion of the principles of reconstruction of the botanical exposition of the genus thuja on the territory of the Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences]. *Lesnoe khozyaystvo [Forestry]*, 2010, no. 5, p. 72.

- [18] Rumyantsev D.E., Cherakshev A.V. *Dendroklimaticheskaya diagnostika sostoyaniya sosen seksii STROBI v usloviyakh dendrologicheskogo sada MGUL* [Dendroclimatic diagnostics of the state of the STROBI section pines in the conditions of the MSFU dendrological garden]. Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik, 2013, no. 7 (99), pp. 121–127.
- [19] Rumyantsev D.E. *Dendroklimaticheskie issledovaniya i lesovedenie* [Dendroclimatic research and forest science]. Materialy VIII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Problemy prirodopol'zovaniya i ekologicheskaya situatsiya v Evropeyskoy Rossii i na soprodel'nykh territoriyakh» [Proceedings of the VIII International Scientific Conference «Problems of Nature Management and the Ecological Situation in European Russia and Adjacent Territories»]. Belgorod: BGU, 2019, pp. 58–61.

## Authors' information

**Rumyantsev Denis Evgen'evich** ✉ — Dr. Sci. (Biology), Professor of the Department of Forestry, ecology and forest protection of BMSTU (Mytishchi branch), dendro15@list.ru

**Rysin Sergey L'vovich** — Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher of the Laboratory of Dendrology of the Main Botanical Garden named after N.V. Tsitsin of the Russian Academy of Sciences, ser-rysin@yandex.ru

**Kozhenkova Anna Al'bertovna** — Cand. Sci. (Agriculture), Researcher at the Laboratory of Dendrology of the Main Botanical Garden named after N.V. Tsitsin of the Russian Academy of Sciences, kozhenkova\_anna@mail.ru

**Aleksandrov Pavel Sergeevich** — Master graduand of the Department of Landscape architecture and landscape construction of the BMSTU (Mytishchi branch), pavel\_aleksandrov\_95@mail.ru

**Vorob'eva Nataliya Sergeevna** — pg. of the Department of Forestry, ecology and forest protection of the BMSTU (Mytishchi branch), vorobyeva@bmstu.ru

**Epishkov Anton Alekseevich** — pg. of the Department of Forestry, ecology and forest protection of the BMSTU (Mytishchi branch), kam\_ant1983@mail.ru

Received 02.03.2022.

Approved after review 13.10.2022.

Accepted for publication 12.12.2022.

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

## САНИТАРНОЕ СОСТОЯНИЕ КОРЕННЫХ ЕЛЬНИКОВ ТАЙГИ ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ

**В.Г. Стороженко**

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

lesoved@mail.ru

Представлены материалы исследований проведенных в коренных разновозрастных лесах еловых формаций тайги в пределах Европейской России: в северной тайге — ельников на территориях Архангельской обл. и национального парка «Паанаярви» Республики Карелия; в средней тайге — ельников резервата «Вепский лес» Ленинградской обл. и Андомского лесничества Вологодской обл.; в южной тайге — ельников Центрально-Лесного государственного биосферного заповедника Тверской обл. Определены возраст и объемы деревьев, произрастающих на постоянных пробных площадях, построены возрастные ряды древостоев, установлены динамические характеристики, даны оценки санитарному состоянию деревьев и древостоев, пораженности дереворазрушающими грибами биотрофного комплекса, выполнены вычисления объемов древесного отпада по стадиям разложения. Выявлена тесная связь возрастания значений пораженности деревьев с увеличением возраста поколений в возрастных рядах, которая трактуется как закономерность:  $r = 0,98$  при  $m_r = 0,05$  и  $t = 140$ . Динамика формирования возрастных поколений в еловых древостоях протекает значительно медленнее от 4 до 6 раз, чем динамика разложения древесного отпада. Характеристики санитарного состояния коренных еловых древостоев имеют балловую оценку в диапазоне между ослабленными и сильно ослабленными сообществами, с высокими показателями гнилевых фаутов деревьев в возрастных поколениях и древостоев и значительными объемами древесного отпада. Высокие показатели гнилевого поражения деревьев обеспечивают сохранение баланса воспроизводимой и разлагаемой биомассы в динамике еловых лесов. Этот баланс формируется различиями временных периодов накопления биомассы и скоростью разложения древесного отпада.

**Ключевые слова:** санитарное состояние, еловые леса, дереворазрушающие грибы, пораженность древостоев, древесный отпад, баланс биомассы

**Ссылка для цитирования:** Стороженко В.Г. Санитарное состояние коренных ельников тайги Европейской России // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 1. С. 17–25. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-17-25

Коренные разновозрастные леса обширного региона севера Европейской России относятся к исчезающим формациям природных растительных сообществ, в эволюционной динамике которых сформировалась структурная и функциональная оптимальность коадаптации автотрофных и гетеротрофных консортов, рассматриваемая в качестве характеристики устойчивости лесов. В связи с этим одной из актуальных фундаментальных задач лесной науки является изучение тенденций и закономерностей, определяющих особенности функционирования различных консортов коренных разновозрастных лесов как эталонов устойчивых лесных сообществ по сравнению с лесами других структур. Факторы, влияющие на состояние деревьев и древостоев, в целом подразделяются на абиотические и биотические. Первые — способны изменить состояние деревьев и древостоев, т. е. климатогенные, гидрогенные, разнообразные антропогенные факторы, вторые — микогенные, энтомогенные, зоогенные. В настоящей работе сделан акцент на влиянии микогенных факторов ослабления деревьев и

древостоев. В частности, рассмотрено влияние на состояние деревьев дереворазрушающими грибами (ДРГ) биотрофной группы, являющимися первичными агентами микогенного заражения деревьев. Они вызывают гнили стволов и корней деревьев, снижают их состояние до летального и становятся основной причиной перевода их в структуру валежа. Таким образом формируется древесный отпад, который под влиянием ДРГ ксилотрофной группы разлагается до состояния гумуса. В сумме грибы дереворазрушающего комплекса порядков *Aphyllophorales* и *Agaricales* в огромной степени определяют санитарное состояние лесов.

Санитарное состояние — одна из важнейших характеристик структурного и функционального устройства лесов, определяющих их устойчивость. В практике детальных наземных обследований для определения санитарного состояния древостоев используется методика, основанная на визуальной оценке крон и стволов деревьев, позволяющая выявить повреждения энтомовредителями и грибными болезнями [1]. В последней редакции документа [1] санитарное состояние лесов определяется как «характеристика леса,

содержащая сведения о его захламленности, наличии усыхающих и сухостойных деревьев», приводится шкала категорий состояния деревьев, в которой деревья, стоящие в составе древостоя разделены на шесть категорий: 1 — здоровые, 2 — ослабленные, 3 — сильно ослабленные, 4 — усыхающие, 5 — свежий сухостой и 6 — старый сухостой. Деревья, отнесенные к категории «усыхающие», характеризуются как «деревья, поврежденные в сильной степени с максимальной вероятностью их усыхания в текущем вегетационном периоде», т. е. обреченные на усыхание. Можно утверждать, что в этой формулировке деревья категории «усыхающие» уверенно входят в состав консорта «древесного отпада» (coarse woody debris), составляющего часть общей структуры мортмассы лесного биогеоценоза [2, 3]. Таким образом, если принимать эту классификацию, то в структуру древесного отпада входят деревья категорий «усыхающие», «свежий сухостой» и «старый сухостой» из состава древостоя, а также стволы свежего ветровала, бурелома и старого ветровала и бурелома, входящие в состав валежа.

В отечественной и зарубежной литературе сведения об исследованиях в области определения состояния деревьев и древостоев многочисленны и связаны прежде всего с оценкой состояния лесов после повреждения их хвоелистогрызущими вредителями или пирогенными воздействиями [4–8] либо последствиями стихийных бедствий — ветровалами, массовыми усыханиями от техногенных воздействий и т. д. [9]. Санитарное состояние коренных разновозрастных лесов изучено фрагментарно [10–13].

## Цель работы

Цель работы — определение с помощью физических величин характеристик санитарного состояния коренных разновозрастных еловых лесов различных фаз динамики как эталонов устойчивых лесных сообществ по параметрам пораженности ДРГ, объемным показателям древесного отпада, категориям состояния деревьев и древостоев.

## Материалы и методы

В качестве объектов исследований приняты коренные разновозрастные леса еловых формаций эволюционного формирования в подзонах северной, средней и южной тайги Европейской России. В регионах северной тайги: ельники Северодвинского лесничества Архангельской обл. (64°49'91"66; 39°83'82"41) и национального парка «Паанаярви» Республики Карелия (66°9'45"; 30°32'37"); средней тайги: ельники резервата «Вепсский лес» Ленинградской обл. (60°64'70"25; 34°72'10"37) и Андомского лесничества Вологод-

ской обл. (30°45'82"; 36°80'83"53); южной тайги: ельники Центрально-Лесного биосферного заповедника Тверской обл. (56°45'88"40; 32°96'71"30). В типичных для подзон тайги условиях произрастания ельников наиболее производительных типов леса были заложены постоянные пробные площади, на которых проводилась сплошная нумерация деревьев, начиная с диаметра стволов 6 см и выше, пересчет по категориям состояния [1], бурение деревьев у шейки корня с установлением их возраста и выявлением наличия гнилей разных типов (коррозионных и деструктивных). На квадратах 10×10 м выполнено сплошное картирование расположения деревьев и древесного отпада с определением вида, породы, диаметра, стадии разложения [14]. В камеральный период строились возрастные ряды древостоев с распределением деревьев по возрастным поколениям и определялось динамическое положение биогеоценозов [2, 15]. Рассчитывались средние показатели состояния деревьев в возрастных поколениях и в целом для древостоев [1]. По таблицам объемов деревьев вычислялись объемные показатели деревьев в возрастных поколениях и в целом для древостоев и древесного отпада (валежа) [16], в возрастных поколениях возрастных рядов древостоев — пораженность деревьев ДРГ.

Т а б л и ц а 1

### Шкала определения санитарного состояния лесных насаждений

#### Scale for determining the sanitary condition of forest plantations

Лесные насаждения	Состояние, баллы
Без признаков ослабления	1–1,5
Ослабленные	1,51–2,5
Сильно ослабленные	2,51–3,5
Усыхающие	3,51–4,5
Погибшие	Более 4,5

Автором и В.М. Котковой в древостоях пробных площадей и в прилегающих ельниках были собраны плодовые тела, идентифицированы виды ДРГ биотрофного и сапротрофного комплексов [17, 18]. Санитарное состояние древостоев в целом оценивалось по тем же правилам [1] по средним величинам ослабления деревьев, выраженным в баллах, как произведение суммарного показателя количества деревьев каждой категории и индекса самой категории, поделенного на общее количество деревьев в древостое (табл. 1).

## Результаты и обсуждение

Объекты исследований представляют собой типичные для каждой подзоны тайги Европейской России массивы коренных разновозрастных ельников, никогда не подвергавшихся антропо-

Т а б л и ц а 2

## Лесоводственные характеристики коренных ельников зоны тайги Европейской России

## Forestry characteristics of native spruce forests in the taiga zone of European Russia

Регион	Состав, тип леса, полнота, бонитет, запас, м <sup>3</sup> га	Подрост	Подлесок	Покров	Средний возраст, лет	Средний диаметр ствола, см	Средняя высота, м
Северная тайга							
Северодвинское лесничество, Архангельская обл.	8Е1Б1С, чер, 0,6, V, 112,3	Е, С, Б	Рб, Мж, Б	чер, мхи, бр, лиш	177,0	8,5	10,0
Национальный парк «Паанаярви», Республика Карелия	10Е+С, Б, бр-чер, 0,6, IV, 122,7	Е, Б, С	Рб, Мж, Ив	чер, бр, мхи	222,0	15,2	9,0
Средняя тайга							
Заповедник «Вепсский лес», Ленинградская обл.	10Е+Ос, кис-май, 0,8, II, 306,4	Е, Ос	Рб, Мж, Б	кис, май, мхи, пап	121,0	19,7	14,3
Урочище «Атлека», Вологодская обл.	8Е1Б1Ос, кис-чер, 0,7, II, 348,2	Е, Б	Рб, Мж, Б	кис, чер, бр, мхи	196,0	27,8	17,0
Южная тайга							
Центрально-Лесной биосферный заповедник-1, Тверская обл.	8Е2Ос+Б, чер, 0,8, I, 408,8	Е, Б	Рб, Мж, Б	чер, бр, кис, пап	140,2	26,1	19,1
Центрально-Лесной биосферный заповедник-2, Тверская обл.	9Е1Ос+Б, кис-чер, 0,7, I, 581,6	Е, Ос, Б	Рб, Мж, Б	кис, чер, бр, мхи	163,3	29,8	24,5
<i>Примечание.</i> Е — ель; Б — береза; С — сосна; Рб — рябина; Мж — можжевельник; Ив — ива древовидная; Ос — осина; чер — черничник; бр — брусничник; лиш — лишайник; кис — кисличник; май — майник; пап — папоротник.							

генным воздействиям, различного динамического положения — от демутиационного до дигрессивного и климаксного (табл. 2).

Представленные ельники имеют разные соотношения средних значений возраста, диаметра ствола и высоты деревьев, что, в общем, согласуется с их динамическими характеристиками. Например, для ельников дигрессивных фаз динамики показательны повышенные значения запасов древостоя, среднего диаметра стволов и высоты деревьев и, напротив, в ельниках климаксных и демутиационных фаз динамики при относительно небольших запасах древостоев — незначительные величины диаметра стволов и высоты деревьев (табл. 2).

В большой степени влияние на состояние деревьев оказывают ДРГ биотрофного комплекса, поражающие живые деревья и вызывающие их ослабление, снижающие их жизненный потенциал, общую устойчивость к проникновению патогенов и распространению гнилевых фаутов стволов, корней и ветвей (табл. 3).

По данным табл. 3 следует, что изучаемые ельники даже в пределах одной подзоны тайги могут иметь различные параметры возрастных рядов по числу возрастных поколений и объемам деревьев в каждом поколении. Понятно, что эти различия связаны, прежде всего, с различными условиями произрастания отдельных ельников, которые определяют предельный возраст деревьев первого поколения и, следовательно, количество поколений возрастных рядов. Данные об объемах

деревьев в возрастных поколениях характеризуют динамическое положение биогеоценозов в сукцессионном пространстве [2, 15] (см. табл. 3). Преобладание суммарного объема деревьев в возрастных поколениях старше среднего значения возрастного ряда относит биогеоценоз к дигрессивным фазам динамики, младше среднего значения — к демутиационным фазам динамики. Относительно равномерное распределение объемов деревьев в возрастных поколениях определяет биогеоценоз как сообщество климаксной фазы динамики [2]. Особое положение занимает биогеоценоз ельника подзоны средней тайги заповедника «Вепсский лес», в котором в середине возрастного ряда почти отсутствует объем ствольной древесины, в то время как в начале и в конце него имеет значительные по величине показатели. Биогеоценоз с такими показателями возрастного ряда характеризуется как демутиационно-дигрессивный.

Пораженность деревьев ДРГ биотрофного комплекса в возрастных поколениях возрастных рядов фиксируется, начиная с последнего самого младшего возрастного поколения (40–80 лет) и неуклонно возрастает вплоть до первого самого старшего поколения (280–380 лет) предельного для ели возраста в конкретных условиях произрастания биогеоценоза. На протяжении всего временного периода формирования возрастных структур ельников определенная часть деревьев поражается ДРГ биотрофного комплекса с развитием гнилевых фаутов, ослабляется, теряет

Т а б л и ц а 3

**Объемы деревьев и пораженность ДРГ биотрофного комплекса деревьев,  
общая для древостоев и в пределах возрастных поколений**

**The volume of trees and the infestation of the biotrophic trees complex,  
common to stands and within age generations**

Регион	Объемы (числитель, м <sup>3</sup> га) и пораженность (знаменатель, %)												Фаза динамики	
	ДРГ деревьев по возрастным поколениям										всего древостоев	в том числе с гнилями		
	до 40	41–80	81–120	121–160	161–200	201–240	241–280	281–320	321–360	361–400		кор.		дест.
Северная тайга														
Северодвинское лесничество, Архангельская обл.	Пдр	<u>6,1</u> 13,3	<u>3,8</u> 15,7	<u>15,5</u> 39,3	<u>7,6</u> 42,8	<u>30,3</u> 70,5	<u>22,4</u> 50,0	<u>12,1</u> 76,9	<u>24,9</u> 63,1	<u>122,7</u> 42,6	<u>66,5</u> 54,2	<u>56,2</u> 45,8	Дг	
Национальный парк «Паанаярви», Республика Карелия	Пдр	<u>2,0</u> 16,6	<u>8,3</u> 21,4	<u>44,0</u> 20,8	<u>56,9</u> 20,0	<u>1,1</u> 30,3	–	–	–	<u>112,3</u> 17,2	<u>61,2</u> 54,5	<u>51,1</u> 45,5	Дг	
Средняя тайга														
Заповедник «Вепсский лес», Ленинградская обл.	Пдр	<u>18,1</u> 19,4	<u>150,0</u> 7,3	<u>33,1</u> 23,5	<u>1,1</u> 1,0	<u>17,1</u> 40,0	<u>37,7</u> 43,4	<u>49,2</u> 38,5	–	–	<u>306,3</u> 18,6	<u>134,2</u> 43,8	<u>172,1</u> 56,2	Дм-Дг
Урочище «Атлека», Вологодская обл.	Пдр	<u>1,0</u> 0	<u>9,0</u> 5,5	<u>11,6</u> 11,1	<u>6,8</u> 17,0	<u>42,6</u> 17,0	<u>160,6</u> 10,0	<u>87,3</u> 20,0	<u>24,8</u> 67,0	–	<u>348,2</u> 15,2	<u>145,2</u> 41,7	<u>203,0</u> 58,3	Дг
Южная тайга														
Центрально-Лесной биосферный заповедник-1, Тверская обл.	Пдр	<u>3,8</u> 22,0	<u>120,7</u> 30,1	<u>117,0</u> 28,9	<u>65,0</u> 15,0	<u>75,3</u> 42,6	<u>27,0</u> 48,0	–	–	–	<u>408,8</u> 18,5	<u>215,6</u> 52,0	<u>196,2</u> 48,0	Кл
Центрально-Лесной биосферный заповедник-2, Тверская обл.	Пдр	<u>7,1</u> 0	<u>100,3</u> 16,2	<u>187,8</u> 24,1	<u>135,7</u> 9,0	<u>100,0</u> 9,0	<u>50,7</u> 33,0	–	–	–	<u>581,6</u> 15,6	<u>348,9</u> 60,0	<u>232,7</u> 40,0	Кл

Примечание. Пдр — подрост; тип гнили: кор. — коррозийная, дест. — деструктивная; фаза динамики: Дг — дигрессивная, Дм — демутиационная, Кл — климаксная.

механическую прочность стволов, корней и переходит в структуру валежа. К возрасту первого поколения (280–380 лет), когда деревья теряют физиологическую устойчивость к проникновению грибных патогенов, пораженность деревьев возрастает до максимальных значений (см. табл. 3). Связь возрастания значений пораженности деревьев с увеличением возраста поколений в возрастных рядах описана ранее и представлена корреляционной зависимостью:  $r = 0,98$  при  $m_r = 0,05$  и  $n = 140$ , где  $r$  — коэффициент корреляции,  $m_r$  — ошибка коэффициента корреляции и  $t$  — коэффициент достоверности. Связь очень тесная и трактуется как закономерность [2].

Биотрофный комплекс дереворазрушающих грибов лесов еловых формаций, вызывающий гнилевые фауны ели, не слишком обширен. В перечне основных видов представлены следующие наиболее распространенными являются:

– *Armillaria* sp. (в таежной зоне преимущественно *A. borealis* Marxm. et Korhonen) — опенок северный;

– *Climacocistis borealis* (Fr.) Kotl. et Pouzar — северный трутовик;

– *Onnia triquetra* (Lenz.) Imazeki — еловая комлевая губка;

– *Phaeolus schweinitzii* (Fr.) Pat. — трутовик Швейница (вызывает преимущественно гнили корневого и комлевого расположения);

– *Heterobasidion parviporum* Niemelä et Korhonen — корневая губка (способна распространяться по стволу до уровня живой кроны);

– *Porodaedalea chrysoloma* (Fr.) Fiasson et Niemelä — еловая губка (может располагаться на любой высоте по стволу вплоть до нижних ветвей кроны).

Все они относятся к группе факультативных сапротрофов, в большей или меньшей степени склоняющихся к облигатному паразитизму. В коренных разновозрастных ельниках ни один из перечисленных видов не образует очагового распространения, находясь в общем пуле гнилевого поражения деревьев.

Важным элементом санитарного состояния лесов еловых формаций является древесный отпад, в состав которого, как упоминалось выше, входят деревья категорий усыхающих, свежего и старого

Т а б л и ц а 4

## Объемные показатели древесного отпада в анализируемых ельниках европейской тайги

## Volumetric indicators of tree debris in the analyzed spruce forests of the European taiga

Регион	Запас древос- стоя, м <sup>3</sup> га	Объемы валежа (м <sup>3</sup> га) по стадиям разложения, лет						Текущий древесный отпад (категория состояния)				Всего древесного отпада		Фаза дина- мики
		1	2	3	4	5	Всего	Ус	Св	Ст	Все- го	м <sup>3</sup> га	% от запа- са	
		1–3	4–15	16–25	26–35	36–45 (50)								
Северная тайга														
Северодвинское лесничество, Архангельская обл.	112,3	2,2	10,1	7,8	6,6	9,4	36,1	7,2	1,2	4,4	12,8	48,9	43,5	Дг
Национальный парк «Паанаярви», Республика Карелия	122,7	0,8	16,1	16,8	8,5	5,6	47,8	15,3	–	6,0	21,3	69,1	56,3	Дг
Средняя тайга														
Заповедник «Вепский лес», Ленинградская обл.	306,4	9,7	25,7	17,6	17,2	–	70,2	1,1	0,4	7,7	9,2	79,4	25,9	Дм- Дг
Урочище «Атлека», Вологодская обл.	348,2	6,6	39,0	15,1	26,2	28,2	115,1	0,9	–	2,1	3,0	118,1	33,9	Дг
Южная тайга														
Центрально- Лесной биосфер- ный заповедник-1, Тверская обл.	408,8	5,2	24,9	56,5	33,8	19,6	140,0	4,2	–	8,1	12,3	152,3	37,3	Кл
Центрально- Лесной биосфер- ный заповедник-2, Тверская обл.	581,6	34,2	22,3	6,8	2,3	9,5	75,1	8,9	0,9	38,6	48,4	123,5	21,3	Кл

*Примечание.* Категория состояния: Ус — усыхающие, Св — свежий сухостой, Ст — старый сухостой.

сухостоя, а так же стволы свежего и старого ветровала и бурелома, составляющих структуру валежа (табл. 4).

Данные табл. 4 наглядно демонстрируют значительные различия объемов древесного отпада в биогеоценозах коренных разновозрастных ельников. В некоторых биогеоценозах он может составлять более половины запаса древостоя (табл. 4). По подзонам тайги можно заметить несколько более повышенные объемы древесного отпада в представленных ельниках северной тайги по отношению к запасам древостоев.

Можно также отметить большие объемы валежа в ельниках подзоны южной тайги, однако по отношению к запасам древостоев они меньше, чем в ельниках подзоны северной тайги. Эти данные говорят о большом участии в формировании структур древостоев и древесного отпада коренных разновозрастных ельников индивидуальных особенностей роста и динамики развития.

Сравнительный анализ данных табл. 3 и 4 позволяет отметить важные особенности в формировании древесного отпада в динамических

процессах накопления биомассы древостоями по возрастным поколениям и в разложении этой биомассы в структурах валежа. Во-первых, движение во временной динамике объемов деревьев по возрастным поколениям с одновременным вывалом части деревьев в структуру древесного отпада (см. табл. 3) определяет и величину валежа по стадиям разложения (см. табл. 4). Во-вторых, временная динамика формирования возрастных поколений в древостоях протекает значительно медленнее, чем динамика разложения древесного отпада. При этом она определяется в ретроспективной части факторами, влияющими на скорость разложения валежа (породой, положением относительно земли, диаметром стволов валежа, относящихся к определенной стадии разложения, лесорастительной зоной и т. д.), в текущем временном периоде — длиной возрастного ряда и объемами деревьев в возрастных поколениях. Приблизительно таким образом природе удается сохранять баланс накопления и разложения биомассы лесного сообщества. Динамика преобразования древесной биомассы от живого

## Показатели ослабления коренных ельников европейской тайги

## Indicators of weakening of the native spruce forests in the European taiga

Регион	Запас древостоя, м <sup>3</sup> га	Количество деревьев в категориях состояния, %						Средняя категория состояния для древо- стоя	Фаза динамики
		1	2	3	4	5	6		
Северодвинское лесничество, Архангельская обл.	112,3	28	42	22	2	1	5	2,2	Дг
Национальный парк «Паанаярви», Республика Карелия	122,7	36	43	10	2	0	9	2,1	Дг
Заповедник «Вепский лес», Ленинградская обл.	306,4	53	16	9	5	1	18	2,4	Дм-Дг
Урочище «Атлека», Вологодская обл.	348,2	47	38	13	1	0	1	2,2	Дг
Центрально-Лесной биосферный заповедник-1, Тверская обл.	408,8	39	31	16	4	0	10	2,3	Кл
Центрально-Лесной биосферный заповедник-2, Тверская обл.	581,6	46	21	8	6	1	18	2,6	Кл

*Примечание.* Категория состояния деревьев: 1 — здоровые, 2 — ослабленные, 3 — сильно ослабленные, 4 — усыхающие, 5 — свежий сухостой и 6 — старый сухостой.

состояния в составе древостоя до полного разложения древесного опада в климаксом сообществе прослеживается примерно за 300-летний период, а в некоторых биогеоценозах и до 400 лет (Северодвинское лесничество, Архангельская обл.). На протяжении всего временного периода, по которому определяется санитарное состояние биогеоценоза, сначала осуществляется разделение деревьев древостоя по категориям состояния, а затем учет объема древесного опада по стадиям разложения.

Дереворазрушающие грибы биотрофного и сапротрофного комплексов являются мощным эндогенным «механизмом», активно влияющим на изменение состояния деревьев и древостоев, сохраняющим баланс воспроизводимой и разлагаемой биомассы лесных сообществ и поддерживающим устойчивость лесного сообщества. В динамике древесных фракций, выражаясь языком летчиков, «ведущей» является живая часть древостоя, его, а «ведомым» — древесный отпад.

Сапротрофный комплекс дереворазрушающих грибов, во-первых, значительно более многочислен по числу видов на разных этапах разложения стволов валежа, нежели биотрофный, вызывающий гнили живых деревьев, во-вторых, процессы ксилолиза отмершей древесины древесного опада протекают значительно интенсивнее, не встречая сопротивления уже отмерших деревьев, что также может быть связано с различными временными периодами участия грибов биотрофной и сапротрофной групп в сохранении баланса воспроизводимой и разлагаемой биомассы лесов.

Представленные выше моменты относятся к одним из основных, но не ко всем факторам, влияющим на состояние деревьев и древостоев коренных разновозрастных лесов. В процессах ослабления деревьев и древостоев принимают участие многие как эндогенные (пищевая и световая конкуренции, зоогенные и микогенные) факторы, так и экзогенные (климатогенные, гидрогенные, радиационные, аэрогенные), совокупное влияние которых отражается на состоянии лесов. В табл. 5 представлены параметры средних значений количества деревьев в категориях состояния анализируемых древостоев.

По данным табл. 5 видно, что три древостоя из шести имеют относительно высокие значения в категории «здоровые» и превышают 40 % общего числа деревьев — биогеоценозы 3, 4 и 6, в остальных древостоях сумма ослабленных и сильно ослабленных деревьев колеблется от 29 % в древостое 6 до 64 % в древостое 1. Значительную корректировку в общее состояние всех изучаемых древостоев вносят суммарные показатели категорий текущего древесного опада — «усыхающие», «свежий сухостой» и «старый сухостой». Именно они снижают общие показатели ослабления древостоев, имеющих высокие баллы категорий «здоровые».

## Выводы

В целом по результатам анализа состояния коренных разновозрастных ельников зоны тайги Европейской России можно отметить значительные показатели ослабления древостоев, имеющих оценку в баллах в диапазоне между ослабленными и сильно ослабленными сообществами.

Подтверждена тенденция увеличения пораженности деревьев дереворазрушающими грибами биотрофного комплекса с высокими показателями гнилевых фаутов деревьев в возрастных поколениях от младшего возраста к предельному для породы, определяемая как закономерность:  $r = 0,98$  при  $m_r = 0,05$  и  $t = 140$ .

Древесный отпад, как важная характеристика санитарного состояния коренных разновозрастных лесов, имеет различные показатели значений объема в ельниках разного динамического состояния. В некоторых биогеоценозах он может составлять более половины запаса древостоя.

Высокие значения пораженности деревьев в возрастных поколениях и древостоев в целом определяют объем древесного отпада. В то же время такие характеристики обеспечивают сохранение баланса воспроизводимой и разлагаемой биомассы в динамике онтогенеза сообществ. В свою очередь этот баланс формируется различиями временных периодов (скоростью) накопления биомассы в процессе построения возрастных рядов древостоев и скоростью разложения древесного отпада. Соотношение временных периодов (скоростей) обоих процессов может достигать четырех-шестикратных значений, т. е., динамика накопления древесной биомассы протекает в 4–6 раз медленнее, нежели ее разложение комплексами дереворазрушающих грибов порядков *Arhylophorales* и *Agaricalts* и грибов других таксономических группировок, сменяющих одна другую в процессе разложения древесного отпада до состояния гумуса почвы.

## Список литературы

- [1] Правила санитарной безопасности в лесах. Утверждены постановлением Правительства Российской Федерации от 9 декабря 2020 г. № 2047. 18 с.
- [2] Стороженко В.Г. Устойчивые лесные сообщества. Теория и эксперимент. Тула: Гриф и К, 2007. 190 с.
- [3] Шорохова Е.В. Запасы и экосистемные функции крупных древесных остатков в таежных лесах: дис. ... д-ра биол. наук. СПб., 2018. 299 с.
- [4] Горшков В.В., Ставрова Н.И., Тарасова В.Н. Повреждение деревьев сосны обыкновенной и древесного яруса основных лесов Европейского Севера в результате пожаров // Лесоведение, 2004. № 5. С. 10–19.
- [5] Cheng-Jung Lin, Yue-Hsing Huang, Gwo-Shyong Huang, Meng-Ling Wu. Detection of decay damage in iron-wood living trees by nondestructive techniques // J. Wood Sci., 2016, vol. 62, pp. 42–51. DOI: 10.1007/s10086-015-1520-9
- [6] Демидко Д.А. Состояние кедровых древостоев Северо-Восточного Алтая и методы его оценки // Лесоведение, 2011. № 1. С. 19–27.
- [7] Лямцев Н.И., Малахова Е.Г. Динамика санитарного состояния еловых лесов Подмосквы после засухи 2010 г. // Вестник МГУЛ – Лесной вестник, 2013. Т. 18. № 6. С. 82–89.
- [8] Замолотчиков Д.Г. Оценка пула углерода крупных древесных остатков в лесах России с учетом влияния пожаров и рубок // Лесоведение, 2009. № 4. С. 3–15.
- [9] Уланова Н.Г. Причины и следствия естественного распада ельников в Европейской части России // Современные концепции экологии биосистем и их роль в решении проблем сохранения природы и природопользования: материалы Всерос. (с междунар. участием) науч. шк.-конф., посвящ. 115-летию со дня рождения А.А. Уранова. г. Пенза, 10–14 мая 2016. Пенза: Изд-во Пензенского государственного университета, 2016. С. 288–290.
- [10] Stokland J.N., Siitonen J., Jonsson B.G. Biodiversity in dead wood. Cambridge Univ. Press, 2012, 509 p.
- [11] Сергиенко В.Г., Иванов А.М., Власов Р.В., Антонов О.И. Древесный отпад и биоразнообразие на участках выборочных рубок в Ленинградской области // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства, 2015. № 3. С. 4–19.
- [12] Бобкова К.С., Кузнецов М.А., Осипов А.Ф. Запасы крупных древесных остатков в ельниках средней тайги Европейского Северо-Востока. // ИзВУЗ Лесной Журнал, 2015. № 2 (344). С. 9–21.
- [13] Hekkala A.M., Ahtikoski A., Patalo M-L., Tarvainen O., Siipilehto J., Tolvanen A. Restoring volume, diversity and continuity of deadwood in boreal forests // Biodiversity Conservation, 2016, v. 25, pp. 1107–1132.
- [14] Стороженко В.Г. Датировка разложения валежа ели // Экология, 1990. № 6. С. 66–69.
- [15] Дыренков С.А. Структура и динамика таежных ельников. М.: Наука, 1984. 176 с.
- [16] Третьяков Н.В., Горский П.В., Самойлович Г.Г. Справочник таксатора. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1952. 853 с.
- [17] Стороженко В.Г., Коткова В.М. Новые и малоизвестные для Тверской области виды афиллофоровых грибов // Вестник Тверского государственного университета. Сер. Биология и экология, 2012. Вып. 26. № 16. С. 125–134.
- [18] Ананьев В.А., Лейнонен Т., Грабовик С.И. Результаты обследования средневозрастных еловых древостоев после рубок ухода // Resources and Technology, 2005. № 6. С. 5–7.

## Сведения об авторе

**Стороженко Владимир Григорьевич** — д-р биол. наук, гл. науч. сотр. лаборатории лесоводства и биологической продуктивности, Институт лесоведения РАН, lesoved@mail.ru

Поступила в редакцию 03.06.2022.

Одобрено после рецензирования 16.11.2022.

Принята к публикации 21.11.2022.

## SANITARY CONDITION OF NATIVE TAIGA SPRUCE IN EUROPEAN RUSSIA

V.G. Storozhenko

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

lesoved@mail.ru

The materials of studies carried out in the primary uneven-aged spruce forests of the taiga within European Russia are presented, in the northern taiga spruce forests are studied in the territories of the Arkhangelsk region and the Paanajarvi National Park in the Karelia Republic; in the middle taiga spruce forests are studied in the reserve «Vepssky forest» in the Leningrad region and Andomsky forestry of the Vologda region; in the southern taiga spruce forests of the Central Forest State Biosphere Reserve in the Tver Region are studied. The age and volume of trees growing on permanent test plots were determined, age series of forest stands were modelled, dynamic characteristics were established, estimates of the sanitary condition of trees and stands were made, the infestation of the biotrophic complex with wood-destroying fungi and calculations of the tree waste volume by stages of decomposition were made. A close relationship between the increase in tree damage values and the increase in the age of generations in the age series was revealed, which is interpreted as a pattern:  $r = 0,98$  with  $m_r = 0,05$  and  $t = 140$ . The dynamics of the formation of age generations in spruce forest stands proceeds much more slowly from 4 to 6 times than the dynamics of wood debris decomposition. The characteristics of the sanitary state of native spruce stands are in the range between weakened and severely weakened communities, with high rates of rotten faults of trees in age generations and stands and significant amounts of tree waste. High rates of rot damage to trees ensure the balance of reproducible and degradable biomass in the dynamics of spruce forests. This balance is formed by differences in the time periods of biomass accumulation and the rate of decomposition of wood waste.

**Keywords:** sanitary condition, spruce forests, wood-destroying fungi, infestation of stands, coarse woody debris, biomass balance

**Suggested citation:** Storozhenko V.G. *Sanitarnoe sostoyanie korennykh el'nikov taygi Evropeyskoy Rossii* [Sanitary condition of native taiga spruce in European Russia]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 1, pp. 17–25. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-17-25

### References

- [1] *Pravila sanitarnoy bezopasnosti v lesakh. Utverzhdeny postanovleniem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 9 dekabrya 2020 g. № 2047* [Sanitary safety rules in forests. Approved by Decree of the Government of the Russian Federation of December 9, 2020, no. 2047]. 18 p.
- [2] Storozhenko V.G. *Ustoychivye lesnye soobshchestva. Teoriya i eksperiment* [Sustainable forest communities. Theory and experiment]. Tula: Grif and K, 2007, 190 p.
- [3] Shorokhova E.V. *Zapasy i ekosistemnye funktsii krupnykh drevesnykh ostatkov v taezhnykh lesakh* [Stocks and ecosystem functions of large tree residues in taiga forests]. *Dr. Sci. (Biol.)*. St. Petersburg, 2018, 299 p.
- [4] Gorshkov V.V., Stavrova N.I., Tarasova V.N. *Povrezhdenie derev'ev sosny obyknovennoy i drevesnogo yarusa sosnovykh lesov Evropeyskogo Severa v rezul'tate pozharov* [Damage to Scotch pine trees and the tree layer of pine forests of the European North as a result of fires]. *Lesovedenie*, 2004, no. 5, pp. 10–19.
- [5] Cheng-Jung Lin, Yue-Hsing Huang, Gwo-Shyong Huang, Meng-Ling Wu. Detection of decay damage in iron-wood living trees by nondestructive techniques. *J. Wood Sci.*, 2016, vol. 62, pp. 42–51. DOI: 10.1007/s10086-015-1520-9
- [6] Demidko D.A. *Sostoyanie kedrovyykh drevostoev Severo-Vostochnogo Altaya i metody ego otsenki* [State of Siberian pine stands in the North-Eastern Altai and methods of its assessment]. *Lesovedenie*, 2011, no. 1, pp. 19–27.
- [7] Lyamtsev N.I., Malakhova E.G. *Dinamika sanitarnogo sostoyaniya elovykh lesov Podmoskov'ya posle zasukhi 2010 g.* [Dynamics of the sanitary state of the spruce forests of the Moscow region after the drought of 2010]. *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*, 2013, v. 18, no. 6, pp. 82–89.
- [8] Zamolodchikov D.G. *Otsenka pula ugleroda krupnykh drevesnykh ostatkov v lesakh Rossii s uchetom vliyaniya pozharov i rubok* [Estimation of the carbon pool of large wood residues in the forests of Russia, taking into account the impact of fires and logging]. *Lesovedenie*, 2009, no. 4, pp. 3–15.
- [9] Ulanova N.G. *Prichiny i sledstviya estestvennogo raspada el'nikov v Evropeyskoy chasti Rossii* [Causes and consequences of the natural decay of spruce forests in the European part of Russia]. *Sovremennyye kontseptsii ekologii biosistem i ikh rol' v reshenii problem sokhraneniya prirody i prirodopol'zovaniya: materialy Vseros. (s mezhdunar. uchastiem) nauch. shk.-konf., posvyashch. 115-letiyu so dnya rozhdeniya A.A. Uranova* [Modern concepts of biosystems ecology and their role in solving problems of nature conservation and nature management: materials of Vseros. (with international participation) scientific. school-conf., dedicated. 115th anniversary of the birth of A.A. Uranov]. Penza, May 10–14, 2016. Penza: Penza State University, 2016, pp. 288–290.
- [10] Stokland J.N., Siitonen J., Jonsson B.G. *Biodiversity in dead wood*. Cambridge Univ. Press, 2012, 509 p.
- [11] Sergienko V.G., Ivanov A.M., Vlasov R.V., Antonov O.I. *Drevesnyy otpad i bioraznoobrazie na uchastkakh vyborochnykh rubok v Leningradskoy oblasti* [Tree waste and biodiversity in selective logging sites in the Leningrad Region]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva* [Proceedings of the St. Petersburg Research Institute of Forestry], 2015, no. 3, pp. 4–19.
- [12] Bobkova K.S., Kuznetsov M.A., Osipov A.F. *Zapasy krupnykh drevesnykh ostatkov v el'nikakh sredney taygi Evropeyskogo Severo-Vostoka* [Stocks of large woody residues in the spruce forests of the middle taiga of the European North-East]. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*, 2015, no. 2 (344), pp. 9–21.

- [13] Hekkala A.M., Ahtikoski A., Patalo M-L., Tarvainen O., Siipilehto J., Tolvanen A. Restoring volume, diversity and continuity of deadwood in boreal forests. *Biodiversity Conservation*, 2016, v. 25, pp. 1107–1132.
- [14] Storozhenko V.G. *Datirovka razlozheniya valezha eli* [Dating the decomposition of spruce deadwood]. *Ekologiya* [Ecology], 1990, no. 6, pp. 66–69.
- [15] Dyrenkov S.A. *Struktura i dinamika taezhnykh el'nikov* [Structure and dynamics of taiga spruce forests]. Moscow: Nauka, 1984, 176 p.
- [16] Tret'yakov N.V., Gorskiy P.V., Samoylovich G.G. *Spravochnik taksatora* [Taxiator's handbook]. Moscow–Leningrad: Goslesbumizdat, 1952, 853 p.
- [17] Storozhenko V.G., Kotkova V.M. *Novye i maloizvestnye dlya Tverskoy oblasti vidy afillorovykh gribov* [New and little-known species of aphylophoric fungi for the Tver region]. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Biologiya i ekologiya* [Bulletin of the Tver State University. Series Biology and Ecology], 2012, iss. 26, no. 16, pp. 125–134.
- [18] Anan'ev V.A., Leynonen T., Grabovik S.I. *Rezultaty obsledovaniya srednevozrastnykh elovykh drevostoev posle rubok ukhoda* [Survey results of middle-aged spruce stands after thinning]. *Resources and Technology* [Resources and Technology], 2005, no. 6, pp. 5–7.

## Author's information

**Storozhenko Vladimir Grigor'evich** — Dr. Sci. (Agriculture), Chief research worker of Laboratory Forestry and biological productivity, Forest Science Institute RAS, lesoved@mail.ru

Received 03.06.2022.

Approved after review 16.11.2022.

Accepted for publication 21.11.2022.

## ФОРМИРОВАНИЕ КОРНЕСОМКНУТОЙ ЛЕСНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ ВЫШЕ ГРАНИЦЫ ЛЕСА В ГОРАХ СЕВЕРНОГО УРАЛА

Н.В. Танцырев, Н.С. Иванова✉, И.В. Петрова

ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук», Россия, 620144, г. Екатеринбург,  
ул. 8 Марта, 202а

i.n.s@bk.ru

Представлены материалы исследований, проведенных в зоне горной каменистой кустарничково-мохово-лишайниковой тундры на высоте 1010–1040 м н. у. м. на плато горного массива «Три Бугра» (59°30' с. ш. 59°15' в. д., высота 1060 м н. у. м.). Выявлено, что в условиях горной тундры длина корневых систем всех исследуемых возрастных групп подроста сосны (кедра) сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour) превышает его высоту в 1,2–1,5 раза, а площадь почвенного питания (поле корневой конкуренции) больше площади проективного покрытия крон более чем в 10 раз. Установлена статистически значимая связь длины корней с возрастом подроста ( $R^2 = 0,78$ ) и его высотой ( $R^2 = 0,92$ ). Получены уравнения регрессии. При текущих темпах потепления климата и роста деревьев сибирского кедра (*P. sibirica*) выявленные зависимости позволяют прогнозировать для горной тундры Северного Урала мозаичное формирование первичных подземно-сомкнутых лесных ассоциаций (редколесий) с характерными лесными взаимоотношениями через 20...25 лет, а куртин с многократным переплетением корневых систем — через 40...50 лет.

**Ключевые слова:** *Pinus sibirica*, Северный Урал, горная тундра, корневая система, верхняя граница леса, конкуренция за почвенное питание

**Ссылка для цитирования:** Танцырев Н.В., Иванова Н.С., Петрова И.В. Формирование корнесомкнутой лесной экосистемы выше границы леса в горах Северного Урала // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 1. С. 26–34. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-26-34

В связи с глобальными изменениями климата для всех континентов прогнозируются снижение экосистемных функций и устойчивости биоеоценозов, серьезные изменения их биоразнообразия [1–3], поэтому проблема их динамики признана актуальной в экологии и биогеографии [2–5]. Наиболее ярко климатогенная динамика биоеоценозов прослеживается в экстремальных условиях экотонов — как южных [2, 3, 6] и северных [7–9], так и горных [5, 10–13]. Несмотря на многочисленные исследования, некоторые фундаментальные теоретические и терминологические вопросы пока не решены. В частности, нет четкого определения термина «верхняя граница леса». В настоящее время под ней понимается максимальная высота над уровнем моря распространения и произрастания в той или иной горной системе основных лесообразующих древесных растений в зависимости от климатических, фитоценологических, орографических условий, стадий почвообразовательного процесса и т. д. Причем в довольно широкой полосе своего экотона с увеличением высоты над уровнем моря происходит сильное изменение, как морфологии самих древесных растений, так и структуры, размеров и густоты, образуемых ими ассоциаций [9, 10, 13, 14]. Само понятие верхней границы леса оторвано от существующего определения термина «лес»

как сомкнутого древостоя, под пологом которого формируется специфичная фитоценологическая и почвенно-гидрологическая среда, все компоненты которой взаимосвязаны [15, 16]. Критерием существования леса на той или иной территории считается некоторая минимальная степень (10 %) сомкнутости полога крон деревьев при их высоте не менее 5 м [17]. Определяющим рост и развитие растений и их структурно-функциональные взаимоотношения считается перехват древесным пологом фотосинтетически активной радиации (ФАР) или конкуренция деревьев за свет [18–21]. Между тем, в некоторых случаях установлен приоритет корневой конкуренции деревьев за почвенное питание (или ее относительно равное влияние со световой конкуренцией) на рост и развитие других растительных элементов леса, в первую очередь — подроста [22–24].

В большинстве исследований о верхней границе леса и ее экспансии в горы судили главным образом по параметрам размещения, размерам и интенсивности роста деревьев, куртин или их биогрупп [9, 10, 13, 14]. Однако начальные стадии формирования и прогноз дальнейшего распространения леса определяются прежде всего не размещением взрослых деревьев, а дальностью расселения и степенью выживания их ювенильного поколения, т. е. подроста. Наиболее информативными могут быть такие его показатели, как численность, рост, жизнеспособность, возрастная

структура, приуроченность к субстрату и проективное покрытие («сомкнутость») крон и корневых систем.

Если рассматривать «лес» не только, как сомкнутый в кроновой части древостой, но и как биогеоценоз с достаточно корнесомкнутым древостоем-эдификатором [23], соответственно, и верхняя граница леса в горах должна определяться как верхний высотный предел произрастания деревьев и подроста лесобразующего вида с минимально достаточной сомкнутостью корневых систем и с учетом орографических характеристик (крутизны склона, каменистых выходов и т. д.), которые препятствуют этой сомкнутости.

## Цель работы

Цель работы — определение длины корневых систем подроста *Pinus sibirica* Du Tour, произрастающего в зоне горной тундры Северного Урала, и установление регрессионных связей с его надземными параметрами и возрастом, на основании полученных связей — прогноз смыкания корневых систем подроста.

## Материалы и методы

Исследования проводились в зоне горной каменистой кустарничково-мохово-лишайниковой тундры [25] на высоте 1010–1040 м н. у. м. на плато горного массива «Три Бугра» (высота 1060 м н. у. м., координаты 59°30' с. ш., 59°15' в. д.) в южной части основного водораздела Северного Урала (Наволяинское, Карпинское лесничества Свердловская область), расположенного в 20 км к юго-востоку от горного массива Конжаковский Камень (1560 м н. у. м) (рис. 1). Учет условий среды, численности, жизненности, возраста и параметров подроста древесных растений, видовой состав и проективное покрытие другой растительности выполнен на 30-ти учетных площадках размером 5×5 м, систематически относительно равномерно размещенных по пробной площади. Возраст подроста определен с точностью до одного года по числу вертикальных приростов терминального побега или по числу годовых колец на поперечном срезе основания ствола, измеренных с помощью аппаратуры LinTab-6.

На изучаемой площади *P. sibirica* в значительной мере доминирует в видовом составе и выступает пионерным видом заселения горной тундры древесными растениями. Общеизвестно, что его возобновление обусловлено тесной трофической связью с тонкоклювой кедровкой (*Nucifraga caryocatactes macrorhynchos* Brehm C. L.), которая разносит его семена, создавая небольшими порциями кормовые запасы в верхнем слое почвы. Неиспользованные запасы семян прорастают, образуя характерные плотные группы (так назы-



Рис. 1. Объект исследования: возобновление *Pinus sibirica* в горной каменистой кустарничково-мохово-лишайниковой тундре на плато горного массива «Три Бугра» (1010–1040 м н. у. м.). На заднем плане Тылайско-Конжаковский горный массив (1560 м н. у. м.)

Fig. 1. Object of study: the renewal of *Pinus sibirica* in the mountainous stony shrub-moss-lichen tundra on the «Tri Bugra» plateau (1010–1040 m a.s.l.). In the background there is the Tylaysko-Konzhakovsky mountain range (1560 m a.s.l.)

ваемые «гнезда») всходов, поэтому количественный учет возобновления *P. sibirica* проводился по двум параметрам: количеству «гнезд» подроста и количеству особей в них.

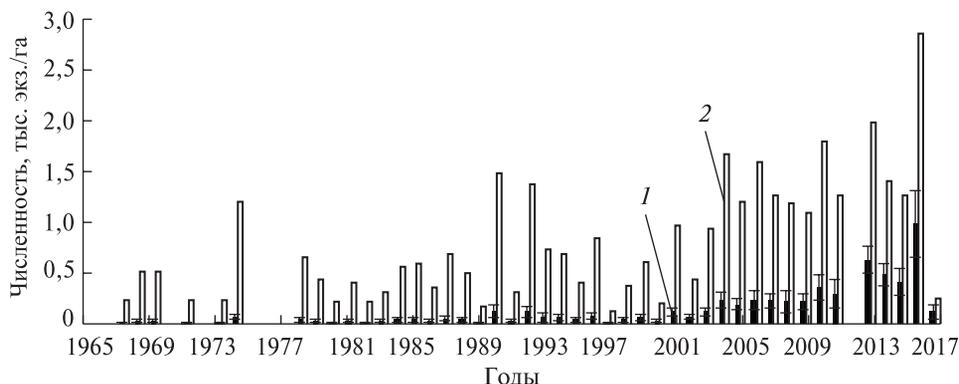
Реконструкция первоначальной численности однолетних всходов *P. sibirica* выполнена по методу построения кривых выживания подроста в его «гнездах» на преобладающих типах субстрата [11, 26].

На пробной площади в качестве модельных отобрано 54 экземпляра подроста *P. sibirica* разных высоты (до 130 см) и возраста (до 56 лет). Кроме определения возраста и надземных параметров у каждого образца на всю длину препарированы все корни, измерена их длина и диаметр через каждые 5 см длины, определена средняя длина корневых систем.

Зависимости длины корней от надземных параметров и возраста исследованы методом регрессионного анализа. Использованы степенные функции, поскольку предполагается, что с возрастом, по мере роста деревьев в высоту происходит определенное снижение энергии роста латеральных корней в длину по гиперболе.

## Результаты и обсуждение

В видовом составе лесобразующих древесных растений на изучаемом плато горной тундры выше существующей верхней границы леса преобладает *P. sibirica* в возрасте до 56 лет ( $6,0 \pm 0,4$  тыс. экз./га в  $3,5 \pm 0,25$  тыс. «гнезд»/га). Встречающиеся экземпляры *Picea obovata* Ledeb и *Pinus sylvestris* L. не старше 10–15-летнего возраста единичны.



**Рис. 2.** Погодичная динамика возобновления *Pinus sibirica* на плато горной тундры: 1 — численность сохранившегося подроста с ошибками средних величин ( $\pm m$ ), тыс. экз./га; 2 — реконструированная численность однолетних всходов, тыс. экз./га  
**Fig. 2.** Yearly dynamics of *Pinus sibirica* regeneration on the mountain tundra plateau: 1 — number of preserved undergrowth with errors of mean values ( $\pm m$ ), thous. ind./ha; 2 — reconstructed number of annual seedlings, thousand ind./ha

Подрост и всходы *P. sibirica* сосредоточены на лишайниково-моховом субстрате с преобладанием *Pleurozium Schreberi* (проективное покрытие 10%), на мохово-лишайниковом с преобладанием *Cladonia sp.* (проективное покрытие 46,6%) и на субстрате, образованном плотным покровом *Arctostaphylos urva-ursi* (21,4%). Редкие кустарники *Betula nana*, *Rosa cinnamomea*, *Salix sp.* высотой не более 20 см с общим проективным покрытием 12,6% и низкорослые стелящиеся кустарнички *Vaccinium uliginosum*, *V. vitis idaea*, *Empetrum nigrum*, *Dryas octopetala* с проективным покрытием 45% не препятствуют созданию кедровкой запасов семян.

Мощность почвенного горизонта на плато составляет 5...15 см (местами — до 20 см), под которым располагается подстилаящая каменистая горная порода в виде больших единых монолитов. Выходящие местами каменистые образования занимают в целом 17,1% общей поверхности пробной площади.

Согласно возрастной структуре подроста (рис. 2) относительно непрерывное ежегодное возобновление *P. sibirica* началось в конце 1960-х гг. и его интенсивность значительно возросла в начале 2000-х годов.

Большая часть подроста имеет две или три вершины, кроме того, около 20% подроста старше 20 лет с сухими вершинами. Кроны состоят из редких единичных боковых побегов и характеризуются как ажурные. В горной тундре единичные боковые побеги у подроста *P. sibirica* появляются к 7-летнему возрасту. И с этого возраста по высоте он начинает выделяться над кустарничковым ярусом.

По результатам определения возраста, модельные экземпляры *P. sibirica* объединены в четыре возрастные группы с отнесенными соответствующими

### Средние параметры подроста *Pinus sibirica* по возрастным группам

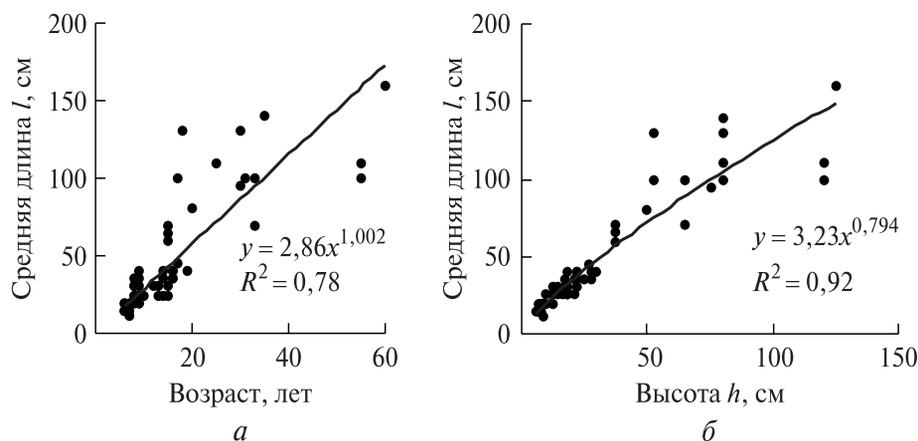
#### Average parameters of *Pinus sibirica* undergrowth by age groups

Параметр подроста	Возраст подроста, лет			
	7...10	12...20	25...35	45...56
Высота подроста, см	15 ± 0,5	32 ± 1,9	56 ± 5,1	114 ± 8,8
Диаметр кроны, см	12	24	38	65
Длина корней*, см	25 ± 2	50 ± 5	95 ± 9	125 ± 15
Площадь питания, м <sup>2</sup>	0,2	0,78	2,83	4,91

\*Параметры модельных экземпляров.

ими средними значениями надземных параметров всего подроста (таблица). В соответствующих возрастных группах модельных экземпляров подроста установлены следующие максимальные значения длины корней: 40 см в возрасте 9 лет при его высоте 18 см; 130 см в возрасте 18 лет при его высоте 80 см; 140 см в возрасте 35 лет при его высоте 80 см; 180 см в возрасте 56 лет при его высоте 125 см.

Таким образом, почти одинаковый по высоте подрост может принадлежать разным возрастным группам. В условиях горной тундры с возрастом корневая система подроста *P. sibirica* разрастается более интенсивно, чем ее надземная часть. Длина боковых корней превышает его высоту в 1,2...1,5 раза, а длину его боковых побегов в 4...5 раз. Начиная с раннего возраста у подроста корневая система выходит за пределы проекции кроны, в то время как под пологом и на вырубках это происходит к 40-летнему возрасту [27]. Сильно развитые боковые корни в количестве от 3 до 7 распространяются в верхнем горизонте почвы на



**Рис. 3.** Зависимость средней длины корневой системы (см) подроста *P. sibirica* в поясе горной тундры Северного Урала от его возраста (а) и высоты (б)

**Fig. 3.** Dependence of the average length of the root system (cm) of *P. sibirica* undergrowth in the mountain tundra belt of the Northern Urals on its age (a) and height (b)

глубине 5–10 см от поверхности. Причем у подростов старших возрастных групп высотой более 40 см они тянутся, не изменяя своего диаметра (от 1–2 до 4–6 мм) на протяжении нескольких десятков сантиметров, проникая в трещины подстилающей горной породы.

Регрессионный анализ выявил тесную ( $R^2=0,78$ ) положительную и практически прямолинейную связь средней длины корней подростов с его возрастом (рис. 3, а), и еще более тесную ( $R^2=0,92$ ) с его высотой (рис. 3, б).

К настоящему времени общая численность подростов *P. sibirica* всех возрастов (начиная с первой генерации 1967 г.) — около 3,5 тыс. «гнезд»/га, большая часть которых в возрасте старше 10 лет состоит из одного экземпляра. При этом средняя высота составляет  $27 \pm 2$  см (максимальная — не превышает 180 см), а средний диаметр кроны —  $25 \pm 2$  см (площадь проективного покрытия кроны  $0,05$  м<sup>2</sup>). Согласно установленной тесной регрессионной связи, при такой высоте средняя длина корней достигает 44 см. В этом случае площадь занимаемая корневой системой одного деревца — площадь почвенного питания или поле корневой конкуренции [22] — в среднем составляет  $0,6$  м<sup>2</sup>. Следовательно, расчетная общая площадь почвенного питания *P. sibirica* достигает примерно 2,1 тыс. м<sup>2</sup>/га. Таким образом, корневые системы *P. sibirica* охватывают в настоящее время около 21 % проекции поверхности почвы при проективном покрытии кроны около 2 %.

Абсолютное доминирование *P. sibirica* в численности подростов древесных растений на плато горной тундры обусловлено созданием здесь кормовых запасов семян кедровки, которые она способна распространять на значительные расстояния от их источников [28]. Можно предположить, что большая часть всхожих семян анемохорных

древесных видов из расположенных ниже на расстоянии до 1 км древостоев, по всей вероятности, не долетает. Безусловно, в горную тундру кедровка всегда заносила семена *P. sibirica* в предпочитаемые ею открытые типы субстрата [11] для создания запасов. Однако появившиеся ранее всходы, по всей вероятности, не выжили в суровых условиях горной тундры. А появившиеся позднее выжили, что обусловлено начавшимися во второй половине XX в., прогрессирующими климатическими изменениями, в частности повышением средней температуры воздуха (летом) в Субарктическом поясе [8, 11].

Полученные результаты подтверждают, что для подростов *P. sibirica* в горных условиях характерна развитая поверхностно-якорная корневая система при отсутствии стержневого корня [27]. Установленное превышение площади корневых систем над площадью кроны подтверждает предположение С.Н. Санникова [22, 23], что критерием-детерминантом образования леса как стабильного лесного биогеоценоза (в отличие от нелесных экосистем) является не только сомкнутость кроны деревьев, а многократное перекрытие их корневых систем и адекватная корневая конкуренция древостоя-эдификатора. Путем несложных расчетов можно предположить, что при прогрессирующем возобновлении *P. sibirica*, росте и развитии существующего подростов (в первую очередь за счет кроны и латеральных корней), через 20...25 лет, когда его средняя высота достигнет 60...70 см, могут сформироваться первые достаточно корнесомкнутые редколесья (с общим проективным покрытием корневых систем не менее 10 тыс. м<sup>2</sup>/га). При этом смыкание в его кроновой части еще не наметится. Возможно, еще через столько же лет мозаично сформируются и авангардные первичные «подземносомкнутые»

куртины *P. sibirica* (с тройным и большим перекрытием корневых систем деревьев). Вероятно, с их формированием между составляющими компонентами будут развиваться и определенные структурно-функциональные, в том числе конкурентные взаимоотношения, характерные для сомкнутого в корневой части древостоя как лесного биогеоценоза [29–33]. Полное смыкание корневых систем также отрицательно повлияет на рост вновь появляющихся всходов даже при 100%-й солнечной инсоляции, поскольку угнетенное состояние подростка под пологом древостоев во многом объясняется их конкуренцией за почвенное питание [22, 24, 27]. Тогда появятся достаточные основания для вывода о реальном повышении верхней границы леса до этого высотного уровня.

Для изучения и прогнозирования продвижения границы леса в горах широко используются и дают хорошие результаты дендрохронологический анализ ретроспективы динамики и состояния древесной растительности в сочетании с температурными данными региональных метеостанций [13, 14, 34] и оригинальный метод повторной пейзажной съемки [35, 36]. Более того, последний позволяет наглядно продемонстрировать как рост отдельных деревьев, так и их распространение в горах. Однако они основаны на учете и анализе состояния взрослых древесных растений в их надземной части. Предлагаемый нами метод прогнозирования формирования лесных сообществ по состоянию и интенсивности роста подземной части подростка древесных растений резко отличается от них. Он дополняет и существенно расширяет информационные возможности ГИС-технологий, которые обеспечивают огромный поток данных как по отдельным ландшафтам, так и по странам и континентам в целом. ГИС-технологии предоставляют информацию о покрытии крон деревьев, а предлагаемый нами метод — о взаимосвязи между покрытием крон деревьев и корневыми системами. Это чрезвычайно полезно для моделирования динамики верхней границы леса. Поскольку ГИС-технологии и методы распознавания древесных растений и их биомассы активно развиваются, а для исследований используются новые подходы и методы [9, 37–40], то полученные нами результаты будут востребованы.

## Выводы

В условиях горной тундры Северного Урала площадь, занимаемая корневыми системами подростка *Pinus sibirica* (площадь почвенного питания или поле корневой конкуренции) превышает площадь проективного покрытия его крон более чем в 10 раз.

Установленные в результате исследований тесные связи длины корней подростка *P. sibirica* с его возрастом и высотой позволяют по надземным параметрам рассчитывать площадь, занимаемую его корневыми системами и степень их сомкнутости в условиях горной тундры.

При текущих темпах изменения климата, возобновления и роста деревьев *P. sibirica* выявленные зависимости позволяют прогнозировать для горной тундры исследуемого плато Северного Урала мозаичное формирование первичных подземно-сомкнутых лесных ассоциаций (редколесий) с характерными лесными взаимоотношениями через 20–25 лет, а куртин с многократным переплетением корневых систем через 40–50 лет.

Результаты исследования имеют теоретическое значение для уточнения понятия «верхняя граница леса» и развития концепции границы леса как корнесомкнутого лесного биогеоценоза. Полученные результаты позволяют прогнозировать темпы формирования лесных экосистем в горной тундре и смещение верхней границы леса в горах Северного Урала.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук».*

## Список литературы

- [1] Maiti R., Rodriguez H., Ivanova N. Autoecology and ecophysiology of woody shrubs and trees: concepts and applications. John Wiley & Sons, Ltd, 2016. 355 p. <https://doi.org/10.1002/9781119104452>
- [2] Frelich L.E., Montgomery R.A., Reich P.B. Seven ways a warming climate can kill the Southern boreal forest // *Forests*, 2021, v. 12, no. 5. p. 560. <https://doi.org/10.3390/f12050560>
- [3] Du E., Tang Y. Distinct climate effects on Dahurian larch growth at an Asian temperate-boreal forest ecotone and nearby boreal sites // *Forests*, 2022, v. 13, no. 1, p. 27. <https://doi.org/10.3390/f13010027>
- [4] Иванова Н.С. Лесотипологические особенности биоразнообразия и восстановительно-возрастной динамики растительности горных лесов Южного и Среднего Урала: дис. ... д-ра биол. наук: 06.03.02. Екатеринбург, 2019. 304 с.
- [5] Ivanova N.S. Impact of climate changes, timber harvesting, and fires on boreal forests (Example of the Ural mountains, Russia) // *Sustainable Bioresource Management*, New York, Apple Academic Press, 2020, pp. 29–52. <https://doi.org/10.1201/9780429284229-4>
- [6] Evans P., Brown C. The boreal–temperate forest ecotone response to climate change // *Environ. Rev.*, 2017, v. 25, pp. 423–431. <https://doi.org/10.1139/er-2017-0009>
- [7] Григорьев А.А., Дэви Н.М., Кукарских В.В., Вьюхин С.О., Галимова А.А., Моисеев П.А., Фомин В.В. Структура и динамика древостоев верхней границы леса в западной части Плато Путорана // *Экология*, 2019. № 4. С. 311–322. <https://doi.org/10.1134/S1067413619040076>
- [8] Fomin, V., Mikhailovich A., Golikov D., Agapitov E. Reconstruction of the expansion of Siberian larch into the

- mountain tundra in the Polar Urals in the 20th–early 21st centuries // *Forests*, 2022, v. 13, 419 p.  
<https://doi.org/10.3390/f13030419>
- [9] Zhou W., Mazepa V., Shiyatov S.V., Shalaumova Yu., Zhang T., Liu D., Sheshukov A., Wang J., Sharif H.E., Ivanov V. Spatiotemporal dynamics of encroaching tall vegetation in timberline ecotone of the Polar Urals Region, Russia // *Environmental Research Letters*, 2022, v. 17, no. 1, p. 014017.  
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac3694>
- [10] Шиятов С.Г., Мазепа В.С. Современная экспансия лиственницы сибирской в горную тундру Полярного Урала // *Экология*, 2015. № 6. С. 403–410.  
<https://doi.org/10.1134/s1067413615060168>
- [11] Санников С.Н., Танцырев Н.В., Петрова И.В. Инвазия популяций сосны сибирской в горную тундру Северного Урала // *Сибирский экологический журнал*, 2018. № 4. С. 449–461.  
<https://doi.org/10.1134/S1995425518040078>
- [12] Shirk A.J., Cushman S.A., Waring K.M., Wehenkel C.A., Leal-Sáenz A., Toney C., Lopez-Sanchez C.A. Southwestern white pine (*Pinus strobiformis*) species distribution models project a large range shift and contraction due to regional climatic changes // *Forest Ecology and Management*, 2018, v. 411, pp. 176–186.  
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.01.025>
- [13] Hagedorn F., Dawes M.A., Bubnov M.O., Devi N.M., Grigoriev A.A., Mazepa V.S., Shiyatov S.G., Moiseev P.A., Nagimov Z.Y. Latitudinal decline in stand biomass and productivity at the elevational treeline in the Ural mountains despite a common thermal growth limit // *J. of Biogeography*, 2022, v. 47, no. 8, pp. 1827–1842.  
<https://doi.org/10.1111/jbi.13867>
- [14] Шиятов С.Г. Дендрохронология верхней границы леса на Урале. М.: Наука, 1986. 136 с.
- [15] Ткаченко М.Е. Общее лесоводство. М.; Л.: Гослесбухиздат, 1955. 599 с.
- [16] Сукачев В.Н. Основные понятия лесной биогеоценологии // *Основы лесной биогеоценологии*. М.: Наука, 1964. С. 5–49.
- [17] Lorenz M., Fisher R., Mues V. Forest resources in Europe and their condition. Conservation and management of forest genetic resources in Europe / Eds. T. Geburek, J. Turok. Zvolen: Arbora, 2005, pp. 111–126.
- [18] Корзунин М.Д., Тер-Микаэлян М.Г. Конкуренция за свет и динамика модельных особей, независимо распределенных на плоскости // *Проблемы экологического мониторинга и моделирование экосистем*. Л.: Гидрометеоздат, 1982. Т. 5. С. 242–248.
- [19] Pukkala T. Methods describe the competition process in a tree stand // *Scandinavian J. of Forest Research*, 1989, v. 4, no. 2, pp. 187–202. <https://doi.org/10.1080/02827588909382557>
- [20] Колобов А.Н. Моделирование пространственно-временной динамики древесных сообществ: индивидуально-ориентированный подход // *Лесоведение*, 2014. № 5. С. 72–82.
- [21] Fraver S., D'Amato A., Bradford J.B., Jonsson B.G., Jonsson M., Esseen P.A. Tree growth and competition in an old-growth *Picea abies* forest of boreal Sweden: influence of tree spatial patterning // *J. of Vegetation Science*, 2014, v. 25, pp. 374–385. <https://doi.org/10.1111/jvs.12096>
- [22] Санникова Н.С., Санников С.Н., Петрова И.В., Мищенко Ю.Д., Черепанова О.Е. Факторы древостоя-эдификатора: количественный анализ и синтез // *Экология*, 2012. № 6. С. 1–7.
- [23] Санников С.Н., Санникова Н.С. Лес как подземно-сомкнутая дендроценоэкосистема // *Сибирский лесной журнал*, 2014. № 1. С. 25–34.
- [24] Танцырев Н.В., Андреев Г.В. Влияние конкуренции материнского древостоя на рост подростка кедра сибирского на основных типах субстрата // *Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова*, 2020. № 2. Т. 59. С. 145–153.  
<https://doi.org/10.34655/bgsha.2020.59.2.020>
- [25] Горчаковский П.Л. Растительный мир высокогорного Урала. М.: Наука, 1975. 281 с.
- [26] Санников С.Н., Танцырев Н.В. Кривые выживания подростка сосны сибирской как основа реконструкции динамики его численности // *Лесоведение*, 2015. № 4. С. 275–281.
- [27] Судачкова Н.Е., Расторгуева Е.Я., Коловский Р.А. Физиология подростка кедра. М.: Наука, 1967. 123 с.
- [28] Schaming T.D., Sutherland C.S. Landscape- and local-scale habitat influences on occurrence and detection probability of Clark's nutcrackers: Implications for conservation // *PLoS ONE*, 2020, v. 15(5), e0233726.
- [29] Aubin I., Messier C., Kneeshaw D. Population structure and growth acclimation of mountain maple along a successional gradient in the southern boreal forest // *Ecoscience*, 2005, v. 12, pp. 540–548.
- [30] Kalliokoski T. Root system traits of Norway spruce, Scots pine, and silver birch in mixed boreal forests: an analysis of root architecture, morphology, and anatomy. Diss. Forestales. Vantaa: Finnish For. Res. Inst., 2011, v. 121, 65 p.
- [31] Hansson K., Helmsaari H.S., Sah S.P., Lange H. Fine root production and turnover of tree and understorey vegetation in Scots pine, silver birch and Norway spruce stands in SW Sweden // *For. Ecol. Manage*, 2013, v. 309, pp. 58–65.
- [32] Возмищева А.С. Пространственная структура подростка ключевых видов северных кедрово-широколиственных лесов Дальнего Востока // *Научные труды государственного природного заповедника «Присурский»*, 2015. Т. 30, Вып. 1. С. 79–84.
- [33] Шанин В.Н., Рочева Л.К., Шашков М.П., Иванова Н.В., Москаленко С.В., Бурнашева Э.Р. Особенности пространственного распределения биомассы корней некоторых древесных видов (*Picea abies*, *Pinus sylvestris*, *Betula sp.*) // *Известия РАН. Сер. биологическая*, 2015. № 3. С. 316–325.
- [34] Cerrato R., Salvatore M.C., Gunnarson B.E., Linderholm H.W., Carturan L., Brunetti M., De Blasi F., Baronia C. A *Pinus cembra* L. tree-ring record for late spring to late summer temperature in the Rhaetian Alps, Italy // *Dendrochronologia*, 2019, v. 53, pp. 22–31.
- [35] Михайлович А.П., Фомин В.В., Шиятов С.Г. Фотографический атлас ландшафтов Полярного Урала в нижнем течении рек Енгаю и Кердоманшор во второй половине XX — начале XXI веков. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2016. 97 с.
- [36] Fomin V., Ivanova N., Mikhailovich A., Zolotova E. Problem of climate-driven dynamics in the genetic forest typology // *Modern synthetic methodologies for creating drugs and functional materials (mosm2020): AIP Conference Proceedings*, 2021, v. 2388, p. 030007.  
<https://doi.org/10.1063/5.0068806>
- [37] Bayer U., Puschmann O. Automatic detection of woody vegetation in repeat landscape photographs using a convolutional neural network // *Ecological Informatics*, 2019, v. 50, pp. 220–223. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2019.01.012>
- [38] Dourado-Filho L.A., Columby R.T. An experimental assessment of deep convolutional features for plant species recognition // *Ecological Informatics*, 2021, v. 65, p. 101411. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101411>
- [39] Усольцев В.А., Цепордей И.С., Норицин Д.В. Аллометрические модели для оценки биомассы корней лесообразующих родов Евразии дистанционными методами с учетом глобального потепления // *Хвойные boreальной зоны*, 2022. Т. 40. № 1. С. 65–75.
- [40] Ivanova N., Fomin V., Kusbach A. Experience of Forest Ecological Classification in Assessment of Vegetation Dynamics // *Sustainability*, 2022, v. 14, no. 6, p. 3384.  
<https://doi.org/10.3390/su14063384>

## Сведения об авторах

**Танцырев Николай Владимирович** — канд. биол. наук, науч. сотр. ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук», 89502076608@mail.ru

**Иванова Наталья Сергеевна**  — д-р биол. наук, вед. науч. сотр. ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук», i.n.s@bk.ru

**Петрова Ирина Владимировна** — д-р биол. наук, директор ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук», irina.petrova@botgard.uran.ru

Поступила в редакцию 27.05.2022.

Одобрено после рецензирования 20.09.2022.

Принята к публикации 16.11.2022.

## ROOT-CLOSED FOREST ECOSYSTEM FORMATION ABOVE FOREST BOUNDARY IN NORTHERN URALS MOUNTAINS

**N.V. Tantsyrev, N.S. Ivanova , I.V. Petrova**

Botanical Garden of the Ural Branch of the RAS, 202a, 8 Marta st., 620144, Yekaterinburg, Russia

i.n.s@bk.ru

The purpose of this work is to determine the length of the root systems of Siberian stone pine undergrowth (*Pinus sibirica* Du Tour) growing in the mountain tundra of the Northern Urals and to establish regression relationships with its aboveground parameters and age. The studies were carried out in the belt of mountain stony shrub-moss-lichen tundra at an altitude of 1010–1040 m above sea level on the plateau of the «Tri Bugra» mountain massif (59°30' N, 59°15' E). Consideration of environmental conditions and undergrowth of woody plants was carried out on 30 registered plots with a size of 5×5 m. *P. sibirica* is absolutely dominant (6,0 thousand specimens per ha) in the undergrowth. Its constant almost annual renewal began in the end 60s XX century. It was revealed that under the conditions of mountain tundra, the length of the root systems of all studied age groups of *P. sibirica* undergrowth exceeds its height by 1,2...1,5 times, and the area of soil nutrition (field of root competition) exceeds the area of projective crown cover by more than 10 times. A statistically significant relationship between the length of roots and the age ( $R^2 = 0,78$ ) of the undergrowth and its height ( $R^2 = 0,92$ ) are established. Regression equations are obtained. At the current rates of climate warming and the growth of *P. sibirica* trees, the revealed dependences make it possible to predict for the mountain tundra of the Northern Urals mosaic formation of primary underground-closed forest associations (woodlands) with characteristic forest relationships in 20–25 years, and communities with multiple interweaving of root systems in 40–50 years.

**Keywords:** *Pinus sibirica*, Northern Urals, mountain tundra, treeline ecotone, root system, competition for soil nutrition

**Suggested citation:** Tantsyrev N.V., Ivanova N.S., Petrova I.V. *Formirovanie kornesomknutoy lesnoy ekosistemy vyshе granitsy lesa v gorakh Severnogo Urala* [Root-closed forest ecosystem formation above forest boundary in Northern Urals mountains]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 1, pp. 26–34.

DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-26-34

## References

- [1] Maiti R., Rodriguez H., Ivanova N. Autoecology and ecophysiology of woody shrubs and trees: concepts and applications. John Wiley & Sons, Ltd. 2016. 355 p. <https://doi.org/10.1002/9781119104452>
- [2] Frelich L.E., Montgomery R.A., Reich P.B. Seven ways a warming climate can kill the Southern boreal forest. *Forests*, 2021, v. 12, no. 5. p. 560. <https://doi.org/10.3390/f12050560>
- [3] Du E., Tang Y. Distinct climate effects on Dahurian larch growth at an Asian temperate-boreal forest ecotone and nearby boreal sites. *Forests*, 2022, v. 13, no. 1, p. 27. <https://doi.org/10.3390/f13010027>
- [4] Ivanova N.S. *Lesotipologicheskie osobennosti bioraznoobraziya i vosstanovitel'no-vozrastnoy dinamiki rastitel'nosti gornyykh lesov Yuzhnogo i Srednego Urala* [Forest typological features of biodiversity and restoration-age dynamics of vegetation of mountain forests of the Southern and Middle Urals]. Dis. ... Dr. Sci. (Biol.), 06.03.02. Yekaterinburg, 2019, 304 p.
- [5] Ivanova N.S. Impact of climate changes, timber harvesting, and fires on boreal forests (Example of the Ural mountains, Russia). Sustainable Bioresource Management, New York, Apple Academic Press, 2020, pp. 29–52. <https://doi.org/10.1201/9780429284229-4>
- [6] Evans P., Brown C. The boreal-temperate forest ecotone response to climate change. *Environ. Rev.*, 2017, v. 25, pp. 423–431. <https://doi.org/10.1139/er-2017-0009>
- [7] Grigor'ev A.A., Devi N.M., Kukarskikh V.V., V'yukhin S.O., Galimova A.A., Moiseev P.A., Fomin V.V. *Struktura i dinamika drevostoev verkhney granitsy lesa v zapadnoy chasti Plato Putorana* [Structure and dynamics of forest stands at the upper forest boundary in the western part of the Putorana Plateau]. *Ekologiya [Ecology]*, 2019, no. 4, pp. 311–322. <https://doi.org/10.1134/S1067413619040076>

- [8] Fomin, V., Mikhailovich A., Golikov D., Agapitov E. Reconstruction of the expansion of Siberian larch into the mountain tundra in the Polar Urals in the 20th—early 21st centuries. *Forests*, 2022, v. 13, 419 p. <https://doi.org/10.3390/f13030419>
- [9] Zhou W., Mazepa V., Shiyatov S.V., Shalaumova Yu., Zhang T., Liu D., Sheshukov A., Wang J., Sharif H.E., Ivanov V. Spatiotemporal dynamics of encroaching tall vegetation in timberline ecotone of the Polar Urals Region, Russia. *Environmental Research Letters*, 2022, v. 17, no. 1, p. 014017. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac3694>
- [10] Shiyatov S.G., Mazepa V.S. *Sovremennaya ekspansiya listvennitsy sibirskoy v gornuyu tundru Polyarnogo Urala* [Modern expansion of Siberian larch into the mountain tundra of the Polar Urals]. *Ekologiya [Ecology]*, 2015, no. 6, pp. 403–410. <https://doi.org/10.1134/s1067413615060168>
- [11] Sannikov S.N., Tantsyrev N.V., Petrova I.V. *Invaziya populyatsiy sosny sibirskoy v gornuyu tundru Severnogo Urala* [Invasion of Siberian pine populations into the mountain tundra of the Northern Urals]. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal [Siberian Ecological J.]*, 2018, no. 4, pp. 449–461. <https://doi.org/10.1134/S1995425518040078>
- [12] Shirk A.J., Cushman S.A., Waring K.M., Wehenkel C.A., Leal-Sáenz A., Toney C., Lopez-Sanchez C.A. Southwestern white pine (*Pinus strobiformis*) species distribution models project a large range shift and contraction due to regional climatic changes. *Forest Ecology and Management*, 2018, v. 411, pp. 176–186. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.01.025>
- [13] Hagedorn F., Dawes M.A., Bubnov M.O., Devi N.M., Grigoriev A.A., Mazepa V.S., Shiyatov S.G., Moiseev P.A., Nagimov Z.Y. Latitudinal decline in stand biomass and productivity at the elevational treeline in the Ural mountains despite a common thermal growth limit. *J. of Biogeography*, 2022, v. 47, no. 8, pp. 1827–1842. <https://doi.org/10.1111/jbi.13867>
- [14] Shiyatov S.G. *Dendrokronologiya verkhney granitsy lesa na Urale* [Dendrochronology of the upper forest boundary in the Urals]. Moscow: Nauka, 1986, 136 p.
- [15] Tkachenko M.E. *Obshchee lesovodstvo* [General forestry]. Moscow-Leningrad: Goslesbumizdat, 1955, 599p.
- [16] Sukachev V.N. *Osnovnye ponyatiya lesnoy biogeotsenologii* [Basic concepts of forest biogeocenology]. *Osnovy lesnoy biogeotsenologii* [Fundamentals of forest biogeocenology]. Moscow: Nauka, 1964, pp. 5–49.
- [17] Lorenz M., Fisher R., Mues V. Forest resources in Europe and their condition. Conservation and management of forest genetic resources in Europe. Eds. T. Geburek, J. Turok. Zvolen: Arbora, 2005, pp. 111–126.
- [18] Korzukhin M.D., Ter-Mikaelyan M.G. *Konkurentsia za svet i dinamika model'nykh osobey, nezavisimo raspredelennykh na ploskosti* [Competition for light and dynamics of model individuals independently distributed on a plane]. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem* [Problems of ecological monitoring and modeling of ecosystems]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1982, v. 5, pp. 242–248.
- [19] Pukkala T. Methods describe the competition process in a tree stand. *Scandinavian J. of Forest Research*, 1989, v. 4, no. 2, pp. 187–202. <https://doi.org/10.1080/02827588909382557>
- [20] Kolobov A.N. *Modelirovanie prostranstvenno-vremennoy dinamiki drevesnykh soobshchestv: individual'no-orientirovannyi podkhod* [Modeling the spatio-temporal dynamics of tree communities: an individually-oriented approach]. *Lesovedenie*, 2014, no. 5, pp. 72–82.
- [21] Fraver S., D'Amato A., Bradford J.B., Jonsson B.G., Jonsson M., Esseen P.A. Tree growth and competition in an old-growth *Picea abies* forest of boreal Sweden: influence of tree spatial patterning. *J. of Vegetation Science*, 2014, v. 25, pp. 374–385. <https://doi.org/10.1111/jvs.12096>
- [22] Sannikova N.S., Sannikov S.N., Petrova I.V., Mishchikhina Yu.D., Cherepanova O.E. *Faktory drevostoya-edifikatora: kolichestvennyy analiz i sintez* [Tree stand-edificator factors: quantitative analysis and synthesis]. *Ekologiya [Ecology]*, 2012, no. 6, pp. 1–7.
- [23] Sannikov S.N., Sannikova N.S. *Les kak podzemno-somknutaya dendrotsenoekosistema* [Forest as an underground-closed dendrocenoecosystem]. *Sibirskiy lesnoy zhurnal [Siberian Forest J.]*, 2014, no. 1, pp. 25–34.
- [24] Tantsyrev N.V., Andreev G.V. *Vliyaniye konkurentsii materinskogo drevostoya na rost podrosta kedra sibirskogo na osnovnykh tipakh substrata* [Influence of maternal stand competition on the growth of Siberian stone pine undergrowth on the main types of substrate]. *Vestnik Buryatskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii im. V.R. Filippova* [Bulletin of the Buryat State Agricultural Academy V.R. Filippova], 2020, no. 2, v. 59, pp. 145–153. <https://doi.org/10.34655/bgsha.2020.59.2.020>
- [25] Gorchakovskiy P.L. *Rastitel'nyy mir vysokogornogo Urala* [Flora of the high-mountain Urals]. Moscow: Nauka, 1975, 281 p.
- [26] Sannikov S.N., Tantsyrev N.V. *Krivyye vyzhivaniya podrosta sosny sibirskoy kak osnova rekonstruktsii dinamiki ego chislennosti* [Survival curves of Siberian pine undergrowth as a basis for reconstructing its population dynamics]. *Lesovedenie*, 2015, no. 4, pp. 275–281.
- [27] Sudachkova N.E., Rastorgueva E.Ya., Kolovskiy R.A. *Fiziologiya podrosta kedra* [Physiology of cedar undergrowth]. Moscow: Nauka, 1967, 123 p.
- [28] Schaming T.D., Sutherland C.S. Landscape- and local-scale habitat influences on occurrence and detection probability of Clark's nutcrackers: Implications for conservation. *PLoS ONE*, 2020, v. 15(5), e0233726.
- [29] Aubin I., Messier C., Kneeshaw D. Population structure and growth acclimation of mountain maple along a successional gradient in the southern boreal forest. *Ecoscience*, 2005, v. 12, pp. 540–548.
- [30] Kalliokoski T. Root system traits of Norway spruce, Scots pine, and silver birch in mixed boreal forests: an analysis of root architecture, morphology, and anatomy. Diss. *Forestales. Vantaa: Finnish For. Res. Inst.*, 2011, v. 121, 65 p.
- [31] Hansson K., Helmisaari H.S., Sah S.P., Lange H. Fine root production and turnover of tree and understorey vegetation in Scots pine, silver birch and Norway spruce stands in SW Sweden. *For. Ecol. Manage.*, 2013, v. 309, pp. 58–65.
- [32] Vozmishcheva A.S. *Prostranstvennaya struktura podrosta klyuchevykh vidov severnykh kedrovo-shirokolistvennykh lesov Dal'nego Vostoka* [Spatial structure of undergrowth of key species of northern cedar-broad-leaved forests of the Far East]. *Nauchnye trudy gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika «Prisurskiy»* [Scientific works of the state natural reserve «Prisurskiy»], 2015, v. 30, iss. 1, pp. 79–84.
- [33] Shanin V.N., Rocheva L.K., Shashkov M.P., Ivanova N.V., Moskalenko S.V., Burnasheva E.R. *Osobennosti prostranstvennogo raspredeleniya biomassy korney nekotorykh drevesnykh vidov (Picea abies, Pinus sylvestris, Betula sp.)* [Features of the spatial distribution of the biomass of the roots of some tree species (*Picea abies*, *Pinus sylvestris*, *Betula sp.*)]. *Izvestiya RAN. Seriya biologicheskaya* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Biological series], 2015, no. 3, pp. 316–325.

- [34] Cerrato R., Salvatore M.C., Gunnarson B.E., Linderholm H.W., Carturan L., Brunetti M., De Blasi F., Baronia C. A Pinus cembra L. tree-ring record for late spring to late summer temperature in the Rhaetian Alps, Italy. *Dendrochronologia*, 2019, v. 53, pp. 22–31.
- [35] Mikhaylovich A.P., Fomin V.V., Shiyatov S.G. *Fotograficheskiy atlas landshaftov Polyarnogo Urala v nizhnem techenii rek Engayu i Kerdomanshor vo vtoroy polovine XX — nachale XXI vekov* [Photographic atlas of landscapes of the Polar Urals in the lower reaches of the Engayu and Kerdomanshor rivers in the second half of the 20th — early 21st centuries]. Ekaterinburg: UGLTU, 2016, 97 p.
- [36] Fomin V., Ivanova N., Mikhailovich A., Zolotova E. Problem of climate-driven dynamics in the genetic forest typology. Modern synthetic methodologies for creating drugs and functional materials (mosm2020): AIP Conference Proceedings, 2021, v. 2388, p. 030007. <https://doi.org/10.1063/5.0068806>
- [37] Bayer U., Puschmann O. Automatic detection of woody vegetation in repeat landscape photographs using a convolutional neural network. *Ecological Informatics*, 2019, v. 50, pp. 220–223. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2019.01.012>
- [38] Dourado-Filho L.A., Columby R.T. An experimental assessment of deep convolutional features for plant species recognition. *Ecological Informatics*. 2021, v. 65, p. 101411. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101411>
- [39] Usol'tsev V.A., Tsepordey I.S., Noritsin D.V. *Allometricheskie modeli dlya otsenki biomassy korney lesoobrazuyushchikh rodov Evrazii distantsionnymi metodami s uchetom global'nogo potepleniya* [Allometric models for assessing the biomass of the roots of forest-forming genera in Eurasia by remote methods, taking into account global warming]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Coniferous boreal zone], 2022, v. 40, no. 1, pp. 65–75.
- [40] Ivanova N., Fomin V., Kusbach A. Experience of Forest Ecological Classification in Assessment of Vegetation Dynamics. *Sustainability*, 2022, v. 14, no. 6, p. 3384. <https://doi.org/10.3390/su14063384>

*The work was carried out within the state task of the Federal State Budgetary Institution of Science «Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences».*

## Authors' information

**Tantsyrev Nikolay Vladimirovich** — Cand. Sci. (Biology), Scientific Researcher, Institute Botanic Garden Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 89502076608@mail.ru

**Ivanova Natal'ya Sergeevna** — Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher, Institute Botanic Garden Ural Branch of Russian Academy of Sciences, i.n.s@bk.ru

**Petrova Irina Vladimirovna** — Dr. Sci. (Biology), Director of the Institute Botanic Garden Ural Branch of Russian Academy of Sciences, irina.petrova@botgard.uran.ru

Received 27.05.2022.

Approved after review 20.09.2022.

Accepted for publication 16.11.2022.

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

## ДИГРЕССИЯ НАПОЧВЕННОГО ПОКРОВА РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ РЕКРЕАЦИОННЫХ СТОЯНОК НА ТЕРРИТОРИИ НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА «ВАЛДАЙСКИЙ»

О.С. Терентьева<sup>1✉</sup>, Е.Л. Рохлова<sup>1</sup>, И.Г. Хмельщикова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет», 192007, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Воронежская, д. 79

<sup>2</sup>ФГБУ «Национальный парк «Валдайский», 175400, Россия, Новгородская обл., г. Валдай, ул. Победы, д. 5

ox.terentiewa2014@ya.ru

Представлены результаты исследования влияния рекреационной нагрузки на напочвенный покров лесных сообществ национального парка «Валдайский». Приведено сравнение пробных площадей с разной степенью рекреационной нагрузки по видовому составу, обилию видов и соотношению эколого-ценотических групп растений. Выявлены виды — биоиндикаторы дигрессии напочвенного покрова на исследованных участках. На пробных площадях определены наиболее устойчивые к антропогенному воздействию виды травянистых растений (антропофилы) (*Plantago major* L., *Poa annua* L.). Установлены степени дигрессии напочвенного покрова исследованных пробных площадей. Выделены основные факторы антропогенного воздействия, влияющие на напочвенный покров. Определена зависимость видового состава напочвенного покрова от сомкнутости древостоя. Предложены варианты сохранения напочвенного покрова, даны рекомендации по восстановлению растительных сообществ рекреационных стоянок с высокой степенью дигрессии.

**Ключевые слова:** дигрессия, национальный парк «Валдайский», рекреационная нагрузка, антропофилы, напочвенный покров

**Ссылка для цитирования:** Терентьева О.С., Рохлова Е.Л., Хмельщикова И.Г. Дигрессия напочвенного покрова растительных сообществ рекреационных стоянок на территории национального парка «Валдайский» // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 1. С. 35–44. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-35-44

Лесные массивы, расположенные на особо охраняемых природных территориях, все больше привлекают туристов [1]. Вследствие большого количества посетителей на особо охраняемых природных территориях могут начаться естественные процессы лесовосстановления благодаря разрушению мохового покрова, который препятствует возобновлению древостоя [2]. Высокая рекреационная нагрузка часто возникает вследствие эстетической ценности насаждений и развитой инфраструктуры на рекреационных стоянках [3]. Наибольшую популярность для рекреации имеют сосняки, а также березняки кисличные или брусничные [4].

Национальный парк «Валдайский» (далее — НП «Валдайский») находится в юго-восточной части Новгородской обл. на границе с Тверской обл. Площадь его составляет примерно 159 310 га. По административному делению, территория парка располагается в Демянском, Окуловском и Валдайском районах Новгородской обл. Национальный парк «Валдайский» разделен на 13 лесничеств. Большую часть парка занимает рекреационная зона, составляющая 94 020 га, в то время как на заповедную зону приходится площадь 18 083 га, на особо охраняемую зону — 36 014 га, зону

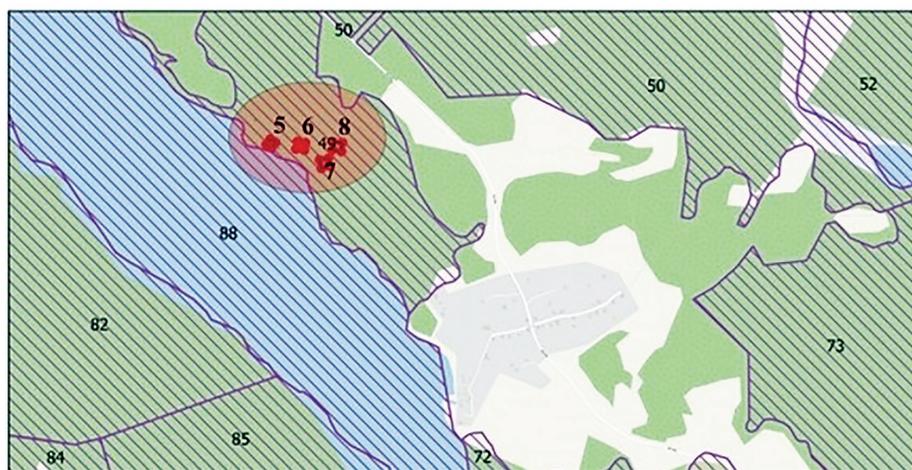
хозяйственного назначения — 11 193 га. [5, 6]. Наибольшую часть территории НП «Валдайский» занимают леса (86 % общей площади парка) [7]. Наиболее посещаемыми являются сосняки, которые имеют высокую эстетическую ценность.

НП «Валдайский» создан в целях сохранения уникального озерно-лесного массива. Каждый год в весенне-летний период НП «Валдайский» подвергается высокой рекреационной нагрузке, обусловленной наличием арт-объекта «Большая Валдайская тропа», другими экологическими тропами, а также туристическими маршрутами и стоянками на территории парка [8].

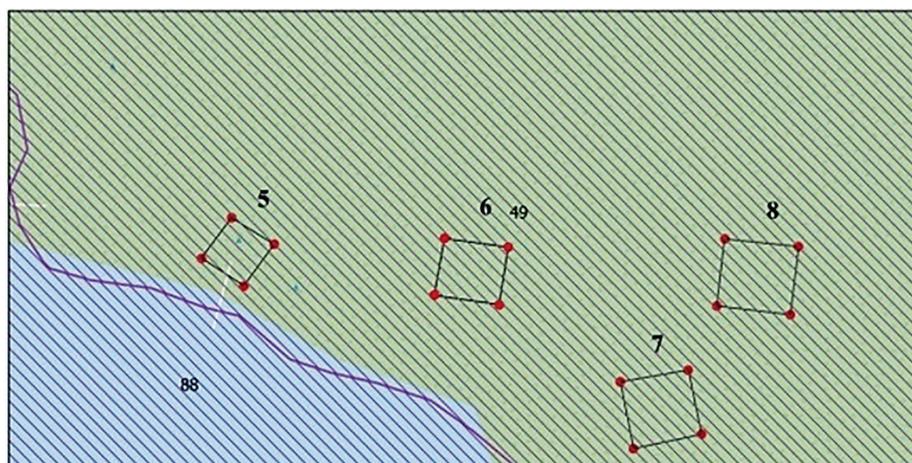
В пределах рекреационной зоны оборудована 91 туристическая стоянка [9]. Наиболее популярным местом среди туристов является берег оз. Вельё, где расположены 38 туристических стоянок, а также неофициальные стоянки, которых в общем насчитывается около 200. Это составляет большую проблему в области сохранения живого напочвенного покрова.

### Цель работы

Цель работы — определение стадий дигрессии напочвенного покрова рекреационных стоянок озера Ужин на территории НП «Валдайский» и разработка рекомендаций по уменьшению степени дигрессии растительных сообществ.



a



б

**Рис. 1.** Расположение пробных площадей на берегу оз. Ужин (рекреационная зона, Байневское лесничество, 49 квартал): *a* — месторасположение пробных площадей на территории Национального парка «Валдайский»; *б* — расположение пробных площадей относительно друг друга; пробные площади № 5 и 7 подвержены рекреационной нагрузке; № 6 и 8 — контрольные

**Fig. 1.** Location of trial plots on lake Uzhin shore (recreational zone, Baynevskoye forestry, quarter 49): *a* — location of trial plots on the territory of the Valday National Park; *б* — location of trial plots relative to each other; trial plots No. 5 and 7 are subject to recreational pressure; No. 6 and 8 — control

## Материалы и методы

При проведении ежегодного мониторинга исследуемой территории оценивались такие основные лесотаксационные параметры, как возраст, высота, диаметр, количество экземпляров древостоя на пробную площадь, а также видовой состав фитоценозов пробной площади. В качестве основного материала для изучения влияния рекреации на живой напочвенный покров в данном исследовании использованы видовой состав напочвенного покрова и его обилие. Эти показатели позволяют в короткий срок определить по видам-индикаторам стадию дигрессии, так как

состав напочвенного покрова очень динамичен и наиболее уязвим при высоких антропогенных нагрузках.

Полевые исследования проводились в рамках геоботанического мониторинга методом пробных площадей (далее — ПП). Ежегодный мониторинг пробных площадей позволяет оценить динамику изменения напочвенного покрова растительных сообществ, а также необходимость проведения мероприятий по охране лесов в целях лесовосстановления. В качестве методик описания ПП были использованы стандартные геоботанические методики, применяемые НП «Валдайский» [10–12].

Принадлежность травянистых видов к группам «сорные» и «луговые» определялись по справочникам. Для сорных растений был использован Классификатор сорных растений [13], а для луговых трав — Справочник по лесным и травянистым растениям [14].

Объектом исследования служил живой напочвенный покров на двух ПП, в прибрежной зоне оз. Ужин. На берегу оз. Ужин находятся три официальных (оборудованных) места для отдыха туристов и 10 необорудованных, но образованных туристами. Решение о закладке ПП именно в районе этого озера было принято, поскольку до этого исследования на берегах оз. Ужин ПП не закладывали.

Геоботаническое исследование проводилось в полевой сезон 2021 г. на ПП площадью 20×20 м в лесном массиве Байневского лесничества, квартал 49. Первая ПП (рис. 1, № 5) была заложена на месте стоянки туристов в 12 м от берега оз. Ужин с подступом к озеру в виде небольшого оврага. Высота над уровнем моря составила 203 м. Вторая ПП была заложена выше первой (см. рис. 1, № 7). Высота над уровнем моря второй ПП составила 217 м. Данные ПП были заложены в одном лесном сообществе, но имели различный напочвенный покров.

На исследованных площадях был описан видовой состав живого напочвенного покрова с обилием видов по шкале Друде. Стадии дигрессии напочвенного покрова были определены согласно стандартным методикам [15–17].

## Результаты и обсуждение

Влияние рекреации сильно сказывается не только на напочвенном покрове, но и на древесном. Так, ухудшение минерально-питательной базы для деревьев вследствие интенсивного вытаптывания приводит к снижению прироста в высоте, диаметре и других лесотаксационных показателях [18]. В качестве основных факторов антропогенной нагрузки в лесных массивах принято выделять вытаптывание, замусоренность участка, наличие кострищ и дорожно-тропиночную сеть [19]. На территории НП «Валдайский» данные факторы чаще всего являются следствием туризма.

В табл. 1 представлен видовой состав напочвенного покрова ПП № 5. В ходе проведения геоботанического мониторинга на данной площадке было выявлено 23 вида травянистых растений, которые по-разному реагируют на рекреационную нагрузку. Из них 15 видов относится к сорным растениям (65 %), 5 видов — к луговым сосудистым растениям (22 %) (табл. 2). Среди сорных видов обильное произрастание выявлено для *Ranunculus acris* L., *Anthriscus sylvestris* (L.) Hoffm.,

Т а б л и ц а 1

### Видовой состав напочвенного покрова на пробной площадке № 5

Species composition of the ground cover on the test sites No. 5

Вид	Семейство	Обилие, по Друде
<i>Melampyrum pratense</i> L.	<i>Scrophulariaceae</i>	sp
<i>Convallaria majalis</i> L.	<i>Convallariaceae</i>	cop1
<i>Pteridium aquilinum</i> (L.) Kuhn	<i>Polypodiaceae</i>	cop2
<i>Equisetum pratense</i> Ehrh.	<i>Equisetaceae</i>	sp
<i>Calluna vulgaris</i> (L.) Hull	<i>Ericaceae</i>	sol
<i>Vaccinium myrtillus</i> L.	<i>Vacciniaceae</i>	sp
<i>Oxalis acetosella</i> L.	<i>Oxalidaceae</i>	sp
<i>Veronica chamaedrys</i> L.	<i>Scrophulariaceae</i>	cop1
<i>Ranunculus acris</i> L.	<i>Ranunculaceae</i>	cop2
<i>Anthriscus sylvestris</i> (L.) Hoffm.	<i>Apiaceae</i>	cop2
<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	<i>Asteraceae</i>	cop1
<i>Fragaria vesca</i> L.	<i>Rosaceae</i>	sp
<i>Maianthemum bifolium</i> (L.) F. W. Schmidt	<i>Convallariaceae</i>	cop1
<i>Aegopodium podagraria</i> L.	<i>Apiaceae</i>	cop2
<i>Plantago major</i> L.	<i>Plantaginaceae</i>	cop2
<i>Trifolium repens</i> L.	<i>Fabaceae</i>	cop1
<i>Ranunculus repens</i> L.	<i>Ranunculaceae</i>	cop1
<i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin. ex Steud.	<i>Poaceae</i>	sp
<i>Poa trivialis</i> L.	<i>Poaceae</i>	cop3
<i>Cerastium fontanum</i> Baumg.	<i>Caryophyllaceae</i>	cop1
<i>Crepis paludosa</i> (L.) Moench	<i>Asteraceae</i>	cop1
<i>Ajuga reptans</i> L.	<i>Lamiaceae</i>	cop1
<i>Poa annua</i> L.	<i>Poaceae</i>	cop3

Примечание. Шкала обилия по Друде: cop3 (copiosus) — растения обильны, являются фоновыми; cop2 — растения попадают часто, разбросаны по площадке; cop1 — растения встречаются изредка, на площадке рассеяны; sp (sparsus) — растения встречаются редко.

*Aegopodium podagraria* L., *Plantago major* L., среди луговых видов — для *Poa trivialis* L., *Poa annua* L.

Наличие на ПП № 5 сорных и луговых видов растений свидетельствует о том, что исследованная территория подвергается антропогенному воздействию. Данные виды обладают антропо-толерантностью, которая позволяет растениям выжить при интенсивном рекреационном использовании территории. Под антропо-толерантностью понимают способность растений противостоять различным антропогенным воздействиям. Благодаря устойчивости к негативным антропогенным факторам упомянутые выше сорные виды и луговые травы более адаптированы к произрастанию в условиях высокой рекреационной нагрузки.

Т а б л и ц а 2  
**Фитоценотическая структура исследуемых  
 пробных площадей**  
**Phytocenotic structure of the studied test sites**

Фитоценотические группы	Число видов	Процент относительно общего числа видов, %
ПП № 5		
Лесные	3	13
Луговые	5	22
Сорные	15	65
<b>Всего</b>	<b>23</b>	<b>100</b>
ПП № 7		
Лесные	6	60
Луговые	1	10
Сорные	3	30
<b>Всего</b>	<b>10</b>	<b>100</b>

Т а б л и ц а 3  
**Видовой состав напочвенного покрова  
 на пробной площади № 7**

**Species composition of the ground cover on the test sites No. 7**

Вид	Семейство	Обилие, по Друде
<i>Vaccinium myrtillus</i> L.	<i>Vacciniaceae</i>	cop3
<i>Fragaria vesca</i> L.	<i>Rosaceae</i>	sp
<i>Trientalis europaea</i> L.	<i>Primulaceae</i>	cop1
<i>Chamaenerion angustifolium</i> (L.) Scop.	<i>Onagraceae</i>	sp
<i>Anthriscus sylvestris</i> (L.) Hoffm.	<i>Apiaceae</i>	sp
<i>Plantago major</i> L.	<i>Plantaginaceae</i>	cop1
<i>Trifolium repens</i> L.	<i>Fabaceae</i>	cop1
<i>Convallaria majalis</i> L.	<i>Convallariaceae</i>	cop2
<i>Calluna vulgaris</i> (L.) Hull	<i>Ericaceae</i>	cop1
<i>Poa annua</i> L.	<i>Poaceae</i>	cop3

На *Ranunculus acris* L. при высокой антропогенной нагрузке среднее отрицательное влияние оказывает уплотнение почвы и резкое отрицательное — механическое повреждение наземных органов [19]. На виды *Anthriscus sylvestris* (L.) Hoffm. и *Aegopodium podagraria* L. оказывают резкое отрицательное воздействие уплотнение почвы и механическое повреждение наземных органов. Наиболее устойчивым к негативным факторам является вид *Plantago major* L. На него оказывают слабое отрицательное воздействие уплотнение почвы и механическое повреждение наземных органов. Вид *Poa trivialis* L. реагирует на уплотнение почвы и механическое повреждение наземных органов в средней отрицательной степени. Из луговых травянистых растений устойчивым является вид *Poa annua* L.

Уплотнение почвы и механическое повреждение наземных органов оказывают слабое отрицательное воздействие на данный вид и другие виды семейства Злаковые. Также отметим, что на все доминирующие на ПП виды растений из группы сорных и луговых не оказывает никакого влияния фактор «обрывания» [20].

В табл. 3 представлен видовой состав напочвенного покрова ПП № 7. По биоразнообразию напочвенный покров на ПП № 7 скуднее, чем на ПП № 5, несмотря на то что эти ПП заложены в пределах одного сообщества. Напочвенный покров ПП № 7 представлен 10 видами травянистых растений. Виды растений, относящиеся к эколого-ценотической группе «лесные», на ПП № 7 составляют 60 % (6 видов) всего видового состава. Для сравнения: виды растений, относящиеся к эколого-ценотической группе «лесные» на ПП № 5 составляют лишь 13 % (3 вида) видового состава, т. е. виды этой эколого-ценотической группы имеют вклад в общее биоразнообразие на ПП № 7 в 4,6 раза больший, чем на ПП № 5.

Группа сорных растений на ПП № 7 представлена тремя видами (30 % общего количества видов): *Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop., *Anthriscus sylvestris* (L.) Hoffm., *Trifolium repens* L. Среди них наиболее встречаемым на ПП № 7 был *Trifolium repens* L. с оценкой обилия по шкале Друде — cop1. Группа луговых растений представлена только одним видом (10 % общего количества видов) — *Poa annua* L. Вид *Poa annua* L. на ПП № 7 имеет оценку обилия по шкале Друде — cop3 (см. табл. 3), что доказывает интенсивный процесс «олуживания» на ПП № 7, как и на ПП № 5.

При высокой антропогенной нагрузке на *Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop. резкое отрицательное влияние оказывают уплотнение почвы и механическое повреждение наземных органов. На *Trifolium repens* L. среднее отрицательное влияние оказывают уплотнение почвы и механическое повреждение наземных органов. Таким образом, на ПП № 7 наиболее устойчивым видом, как и на ПП № 5, является *Poa annua* L. вследствие своего морфологического строения.

Таким образом, при дальнейшем интенсивном использовании рекреационных стоянок, на которых заложены ПП № 5 и № 7, будет наблюдаться уменьшение видового состава. В первую очередь могут исчезнуть виды, на которые уплотнение почвы и механическое повреждение наземных органов оказывают резкое отрицательное воздействие.

Наличие большого числа антропотолерантных видов на ПП № 5 и № 7 обусловлено также характеристиками самого лесного сообщества. При анализе видового состава этих ПП выявлена следующая тенденция — с увеличением сомкнутости древостоя уменьшается видовое разнообразие

напочвенного покрова. Так, на ПП № 5 сомкнутость древостоя составляет 50 % (рис. 2). Это значение указывает на то, что солнечная радиация в данном месте лучше проникает под полог леса, поскольку лишь незначительная ее часть задерживается кронами деревьев, особенно в период вегетации [21]. Благодаря большому количеству поступающей солнечной радиации в напочвенном покрове главенствующее место занимают светолюбивые травы, чаще всего луговые, что и доказывает оценка обилия по шкале Друде (см. табл. 1). На ПП № 7 сомкнутость древостоя составляет 70 %. Соответственно, солнечной радиации поступает меньше, чем на ПП № 5, так как большая ее часть поглощается кронами деревьев и кустарниками.

Выживанию растений в условиях высокой антропогенной нагрузки способствуют их морфологические характеристики. Часто высокую выживаемость имеют виды, которые прилегают к земле, могут расти на плохо аэрированных почвах, а также способны к быстрой регенерации [21].

Также важную роль играет строение корневой системы. Например, *Convallaria majalis* L. имеет длинные ветвящиеся корни, поэтому может успешно существовать в условиях высокой рекреационной нагрузки. Такая корневая система хорошо защищена, и растение не страдает от обрывания цветущих побегов. Придаточные корни способны сохраняться длительное время [20]. Обилие по шкале Друде для данного вида — сор1 и сор2 для ПП № 5 и ПП № 7 соответственно (см. табл. 1, 3) — доказывает существенную роль корневой системы в выживаемости растения в условиях высокой рекреационной нагрузки.

Немаловажное значение в сохранении напочвенного покрова имеет расположение листьев растений, в частности розеточное, которое позволяет растениям сохранять влажность почвы благодаря созданию тени около корня. Розеточное расположение листьев растения дает возможность успешно выдерживать антропогенную нагрузку. Основным видом с розеточным расположением листьев на ПП № 5 и ПП № 7 — *Plantago major* L., являющийся биоиндикатором дигрессии напочвенного покрова (рис. 3).

Виды-биоиндикаторы позволяют быстро определить стадии дигрессии исследуемых площадок. Существует несколько методик определения дигрессии напочвенного покрова, нами были использованы две.

Наиболее простая методика основана на определении отношения площади вытоптанного до минерального слоя почвы к общей площади ПП [15]. По данной методике, ПП № 5 относится к стадии IV дигрессии (11 % вытоптанной площади) (рис. 4), ПП № 7 — к стадии III дигрессии: вытоптаный слой почвы составляет около 8 % (рис. 5).



Рис. 2 Сомкнутость древостоя на пробной площадке № 5  
Fig. 2 Density of the forest stand on the test area No. 5



Рис. 3. Вид *Plantago major* L. — биоиндикатор дигрессии напочвенного покрова  
Fig. 3. *Plantago major* L. bioindicator of ground cover digression

Согласно иной методике [16, 17], в основе которой лежит граница устойчивости природного комплекса, ПП № 5 и № 7 имеют одинаковые стадии дигрессии. В частности, ПП № 5 относится к стадии IV, так как луговые травы составляют 22 % общего числа видов растений, что и является границей устойчивости [16, 17]. Отметим, что ПП № 5 является эталоном стадии IV дигрессии (процент луговых, сорных и лесных трав в напочвенном покрове идентичен значению, предусмотренному методикой). Также и ПП № 7, по данной методике, относится к стадии IV дигрессии (60 % лесных видов растений относительно общего числа видов) (см. табл. 3).

Соотношение эколого-ценотических групп растений (лесные, луговые, сорные) служит основным признаком для определения стадий дигрессии напочвенного покрова [22]. На ПП № 5 преобладает эколого-ценотическая группа сорных растений, а на ПП № 7 — лесных. Таким образом, при сравнении результатов, полученных с помощью двух методик, можно выдвинуть предположение о том, что ПП № 7 находится в переходном состоянии от стадии III дигрессии к стадии IV. Доля участия в напочвенном покрове сорных



Рис. 4. Дигрессия напочвенного покрова на пробной площадке № 5 (стадия дигрессии — IV)

Fig. 4. Digression of the ground cover on the test area No. 5 (digression stage — IV)



Рис. 5. Дигрессия напочвенного покрова на пробной площадке № 7 (стадия дигрессии — III)

Fig. 5. Digression of the ground cover on the test area No. 7 (digression stage — III)

растений увеличивается к стадии III дигрессии, доля участия луговых растений — к стадии IV [23].

На стадиях III и IV дигрессии наиболее остро стоит вопрос о сохранении живого напочвенного покрова. Основная проблема его сохранения заключается в полном уничтожении напочвенного покрова, поэтому важно минимизировать антропогенную нагрузку на данные участки лесного массива. При правильном подходе возможна активация естественных процессов восстановления после уменьшения рекреационного воздействия [24]. Принятие решения о целесообразности применения тех или иных мер по восстановлению напочвенного покрова на нарушенных участках должно основываться на результатах мониторинговых исследований в начале и в конце туристического сезона. Такой мониторинг позволит отследить динамику изменения напочвенного покрова и установить начало его естественного возобновления.

Данные, полученные в результате такого мониторинга (проективное покрытие различных экологическо-ценотических групп растений, обилие по шкале

Друде, наличие видов-биоиндикаторов в напочвенном покрове) являются основой для определения способа восстановления поврежденных участков леса. Под способом восстановления в данном случае следует понимать то или иное мероприятие по восстановлению нарушенного напочвенного покрова на поврежденных участках леса.

В качестве способа восстановления живого напочвенного покрова для сильно нарушенных участков можно применять закрытие рекреационной стоянки на неопределенный срок. Это следует применить к ПП № 5, которая находится на самой рекреационной площадке. Во время исследования на ПП № 5 было обнаружено наличие небольшого оврага, который может увеличиваться в размерах при интенсивных осадках, поскольку начало оврага находится в точке, где сомкнутость древостоя составляет 15 %. Если не применять меры по сохранению напочвенного покрова, то большую часть рекреационной стоянки в будущем займет овраг, который повлечет за собой сильную эрозию почвы всей ПП [25]. Ежегодный мониторинг размеров оврага (длины, глубина, ширина) — основа для применения описанного выше способа восстановления напочвенного покрова. Если в ходе ежегодного мониторинга будет выявлено значительное увеличение размеров оврага на ПП № 5, к нему можно применить выколаживание, т. е. заполнение оврага смесью из гравия и песка (или глины) с последующей реинтродукцией видов травянистых растений местной флоры. Выбор конкретной технологии выколаживания зависит от размеров и объема оврага.

В сочетании с закрытием нарушенных территорий для посещения можно применять другие способы восстановления нарушенного фитоценоза. Ежегодный мониторинг состояния почв ПП — это основа для выбора способа улучшения почвы. Для восстановления напочвенного покрова в сильно нарушенных фитоценозах в первую очередь необходимо провести работы по рыхлению почвы, что повысит ее воздухо- и водопроницаемость. Например, корневая система *Pinus sylvestris* L. развита в горизонтальном и вертикальном направлениях, а чрезмерное уплотнение верхних слоев почвы будет повреждать тонкие корни, которые расположены в горизонтальном направлении. Уплотнение почвы отрицательно влияет на рост наземной части травянистых видов растений, а также замедляет рост главного корня.

Для восстановления напочвенного покрова в короткие сроки может быть применена посадка видов растений, типичных для данных фитоценозов. В таком случае нарушенный травяно-кустарничковый ярус можно частично формировать и за счет реинтродукции редких видов местной флоры. Так, например, можно использовать многолетнее растение *Cinna latifolia* (Trev.) Griseb. в качестве вида, который, несмотря

на нахождении его в Красной книге, может быть использован для восстановления напочвенного покрова. Растение *Cinna latifolia* (Trev.) Griseb занесено в Красную книгу Новгородской обл. и относится к категории «уязвимые виды», благодаря своему строению, а именно длинным подземным побегам, вид способен противостоять антропогенной нагрузке. Можно использовать также и *Carex bohemica* Schreb., *Picris hieracioides* L. Искусственное создание отдельных группировок травянистых растений в нарушенных фитоценозах может положительно повлиять на скорость восстановления естественного напочвенного покрова. Необходим тщательный отбор семян по определенным критериям (только здоровые, с высокой всхожестью и т. д.) Для реинтродукции растений на участке с оврагом на ПП № 5 как доминанты можно использовать светолюбивые травянистые растения, поскольку сомкнутость древостоя здесь составляет всего лишь 50 %. Задернение данного участка, например, искусственное создание злаково-разнотравного фитоценоза, позволит спасти почву от эрозии и повысить биологическое разнообразие напочвенного покрова. При выборе конкретных видов лесной травянистой растительности необходимо руководствоваться видовым составом леса, типом почвы, а также другими экологическими условиями, что позволит в короткие сроки успешно восстановить живой напочвенный покров. Так, например, на ПП № 5 целесообразно использовать в качестве материалов для задернения почвы семена *Phleum pratense* L., *Alopecurus pratensis* L. Эти виды светолюбивы и легко приживутся в условиях высокой освещенности. На рис. 6 представлен *Phleum pratense* L., который часто встречается в национальном парке.

Территория национального парка на 80 % занята сосновыми лесами, в связи с чем целесообразно использовать саженцы молодых растений *Pinus sylvestris* L. для восстановления древесного полога. Благодаря быстрому росту *Pinus sylvestris* L. часто используется для восстановления древесного полога на нарушенных участках леса практически на всей территории Северо-Западного федерального округа.

Еще одним способом сохранения живого напочвенного покрова является регулирование рекреационной нагрузки. По результатам мониторинга ПП выносятся решения о допустимой рекреационной нагрузке на различные рекреационные стоянки в течение туристического сезона. Национальный парк «Валдайский» в рамках научного проекта по изучению и оценке антропогенного воздействия на экосистемы планирует на своей территории до 2025 г. благоустроить туристические стоянки, что позволит увеличить допустимые рекреационные нагрузки на лесную экосистему.



Рис. 6. *Phleum pratense* L. — представитель светолюбивых растений

Fig. 6. *Phleum pratense* L. representative of photophilous plants

В качестве основных способов увеличения допустимых нагрузок будут использованы установка искусственного покрытия (деревянных настилов) в районе туристических стоянок, которые расположены в прибрежных ландшафтах, создание постоянных мест под кострища, установка мусорных контейнеров.

Перечисленные мероприятия по сохранению напочвенного покрова в большей степени относятся к ПП № 5, так как именно здесь отмечается высокая степень дигрессии.

## Выводы

1. Преобладание одной эколого-ценотической группы растений над другой позволяет дать оценку дигрессии напочвенного покрова визуально.
2. Наиболее точные данные о дигрессии напочвенного покрова могут быть получены при сочетании различных методик ее оценки.
3. Обоснованное использование различных способов восстановления, дает возможность сохранить напочвенный покров в условиях высокой антропогенной нагрузки и различных стадий дигрессии. Способы восстановления нарушенного напочвенного покрова на поврежденных участках леса необходимо выбирать на основании данных геоботанического мониторинга ПП в начале и в конце туристического сезона.
4. Применение на ПП № 5 в совокупности мер сохранения напочвенного покрова, описанных выше, позволит в короткие сроки его восстановить.

## Список литературы

- [1] Рысин Л.П. Рекреационное лесопользование: научные и практические аспекты // Лесобиологические исследования на Северо-Западе таежной зоны России: итоги и перспективы: матер. научной конференции, посвященной 50-летию Института леса Карельского научного центра РАН (3–5 октября 2007 года). Петрозаводск: Изд-во Карельского научного центра РАН, 2007. С. 83–94.

- [2] Киреева Ю.А. Естественное возобновление леса в условиях рекреации // Среда, окружающая человека: природная, техногенная, социальная: матер. VI Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной году экологии в России, Брянск, 26–28 апреля 2017 года. Брянск: Изд-во Брянского государственного инженерно-технологического университета, 2017. С. 73–76.
- [3] Лесовская С.Г., Андреев Ю.А. Рекреация в различных типах леса национального парка «Валдайский» // Современные тенденции в научном и кадровом обеспечении АПК: Материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Новгород, 28–29 ноября 2019 года. Новгород: Изд-во Новгородского государственного университета имени Ярослава Мудрого, 2020. С. 260–265.
- [4] Волков С.Н., Борисов В.А., Фокина Е.А. Рекреационные возможности лесных насаждений Чаплыгинского района Липецкой области // International J. of Advanced Studies in Medicine and Biomedical Sciences, 2018. № 1. С. 77–91.
- [5] Кадастровые сведения о национальном парке «Валдайский» за 2013–2016 гг. Валдай: Изд-во ФГБУ Национальный парк «Валдайский», 2017. 101 с.
- [6] Приказ от 29 июня 2016 года № 376 «Об утверждении положения о национальном парке “Валдайский”». URL: <https://docs.cntd.ru/document/420366529> (дата обращения: 09.02.2022).
- [7] Морозова О.В., Царевская Н.Г., Белоновская Е.А. Сосудистые растения национального парка «Валдайский» (аннотированный список видов): аннотированный список видов / под ред. В.С. Новикова. М.: Изд-во Комиссии РАН по сохранению биологического разнообразия, 2010. 95 с.
- [8] Белоновская Е.А., Кудряшова И.Г., Тишков А.А., Царевская Н.Г. Развитие туризма и риски инвазий чужеродных растений на территории национального парка «Валдайский» // Устойчивое развитие особо охраняемых природных территорий: сб. статей VIII Всерос. (национальной) науч.-практ. конф., Сочи, 07–09 октября 2021 года. Сочи: Изд-во ГКУ Краснодарского края «Природный орнитологический парк в Имеретинской низменности», 2021. С. 61–70.
- [9] Белоновская Е.А., Виноградова В.В., Пономарев М.А., Тишков А.А., Царевская Н.Г. Оценка рекреационного потенциала национального парка «Валдайский» // Известия РАН. Сер. географическая, 2019. № 4. С. 97–111.
- [10] Артаев О.Н., Башмаков Д.И., Безина О.В. Методы полевых экологических исследований. Саранск: Изд-во Мордовского ун-та, 2014. 412 с.
- [11] Скарлыгина-Уфимцева М.Д. Методическое руководство по проведению летней практики по ботанической географии. Ленинград: Изд-во Ленингр. ун-та, 1968. 69 с.
- [12] Ипатов В.С., Мирин Д.М. Описание фитоценоза. СПб.: [б. и.], 2008. 71 с.
- [13] Отраслевой классификатор сорных растений. М.: Изд-во ФГБНУ «Росинформагротех», 2018. 52 с.
- [14] Алексеев Ю.Е., Вахрамеева М.Г., Денисова Л.В., Никитина С.В. Лесные травянистые растения. Биология и охрана: Справочник. М.: Агропромиздат, 1988. 223 с.
- [15] ОСТ 56-100-95. Методы и единицы измерения рекреационных нагрузок на лесные природные комплексы. М., 1995. 8 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/471826617> (дата обращения: 09.02.2022).
- [16] Казанская Н.С., Ланина В.В., Марфенин Н.Н. Рекреационные леса (состояние, охрана, перспективы использования). М.: Лесная пром-сть, 1977. 96 с.
- [17] Чижова В.П. Рекреационные ландшафты: устойчивость, нормирование, управление. Смоленск: Ойкумена, 2011. 176 с.
- [18] Бузова Н.В., Феклисов П.А. Антропогенная трансформация пригородных лесов. Архангельск: Изд-во Архангельского ГТУ, 2007. 264 с.
- [19] Сибгатуллина М.Ш. Рекреационная дигрессия растительного покрова на территории заказника «Голубые озера» // Российский журнал прикладной экологии, 2015. № 2(2). С. 15–19.
- [20] Рысина Г.П., Рысин Л.П. Оценка антропоустойчивости лесных травянистых растений // Природные аспекты рекреационного использования леса. М.: Наука, 1987. С. 26–35.
- [21] Кузнецов В.А. Почвы и растительность парково-рекреационных ландшафтов Москвы: дис. ... канд. биол. наук: 03.02.13. Москва, 2015. 170 с.
- [22] Кучук С.Н., Яковлев А.П. Дигрессия живого напочвенного покрова лесных формаций сектора природной флоры ЦБС НАН Беларуси // Проблемы сохранения биологического разнообразия и использования биологических ресурсов: Матер. III Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 110-летию со дня рождения академика Н.В. Смольского. В 2-х частях; Минск, Беларусь, 07–09 октября 2015 года. Минск: Беларусь: ЗАО «Конфидо», 2015. С. 119–121.
- [23] Юшкевич М.В., Петрашкевич А.А. Трансформация живого напочвенного покрова при рекреационном воздействии // Тр. БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов, 2013. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/transformatiya-zhivogo-napochvennogo-pokrova-pri-rekreatsionnom-vozdeystvii> (дата обращения 09.02.2022).
- [24] Беднова О.В. Метод индикации и оценки рекреационных изменений в лесных биогеоценозах // Вестник МГУЛ – Лесной вестник, 2013. № 7. С. 77–87.
- [25] Лысыков А.Б. Влияние рекреации на состояние почв в городских лиственных лесах // Лесоведение, 2011. № 4. С. 11–20.

## Сведения об авторах

**Терентьева Оксана Сергеевна** — магистрант кафедры прикладной и системной экологии, ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет», [ox.terentiewa2014@ya.ru](mailto:ox.terentiewa2014@ya.ru)

**Рохлова Елена Леонидовна** — канд. биол. наук, ст. преподаватель кафедры прикладной и системной экологии, ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет», [e.rohlova@rshu.ru](mailto:e.rohlova@rshu.ru)

**Хмельщикова Ирина Геннадиевна** — ст. науч. сотр. ФГБУ «Национальный парк «Валдайский», [kudryashova.irena@gmail.com](mailto:kudryashova.irena@gmail.com)

Поступила в редакцию 14.03.2022.

Одобрено после рецензирования 13.10.2022.

Принята к публикации 16.11.2022.

## PLANT COMMUNITIES GROUND COVER DIGRESSION OF RECREATIONAL SITES IN VALDAY NATIONAL PARK

O.S. Terent'eva<sup>1</sup>✉, E.L. Rokhlova<sup>1</sup>, I.G. Khmel'shchikova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Russian State Hydrometeorological University, 79, Voronezhskaya st., 192007, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Valday National Park, 5, Pobedy st., 175400, Valday, Novgorod reg., Russia

ox.terentiewa2014@ya.ru

The article presents the results of a study of the influence of recreational pressure on the ground cover of forest communities in the Valday National Park. The comparison of trial plots with different degrees of recreational pressure in terms of species composition, abundance of species and the ratio of ecological cenotic groups of plants is given. The bioindicator species of recreational digression were identified in the studied areas. The most resistant species of herbaceous plants (anthropotolerants) (*Plantago major* L., *Poa annua* L.) were identified on the taste areas. The stages of recreational digression on the tasted areas were determined. The main factors of anthropogenic impact on the ground cover are presented. The dependence of the species composition of the ground cover on the crown density was identified. The options of conservation of the ground cover were suggested. The recommendations for the restoration of plant communities of recreational areas with a high stage of digression were given.

**Keywords:** digression, Valday National Park, recreational load, anthropotolerant species, ground cover

**Suggested citation:** Terent'eva O.S., Rokhlova E.L., Khmel'shchikova I.G. *Digrssiya napochvennogo pokrova rastitel'nykh soobshchestv rekreatsionnykh stoyanok na territorii natsional'nogo parka «Valdayskiy»* [Plant communities ground cover digression of recreational sites in Valday National Park]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 1, pp. 35–44. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-35-44

### References

- [1] Rysin L.P. *Rekreatsionnoe lesopol'zovanie: nauchnye i prakticheskie aspekty* [Recreational forest management: scientific and practical aspects]. *Lesobiologicheskie issledovaniya na Severo-Zapade taezhnoy zony Rossii: itogi i perspektivy: mater. nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy 50-letiyu Instituta lesa Karelskogo nauchnogo tsentra RAN* [Forest biological research in the North-West of the taiga zone of Russia: results and prospects: mater. scientific conference dedicated to the 50th anniversary of the Forest Institute of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. October 3–5, 2007. Petrozavodsk: Publishing House of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2007, pp. 83–94.
- [2] Kireeva Yu.A. *Estestvennoe vozobnovlenie lesa v usloviyakh rekreatsii* [Natural regeneration of the forest in conditions of recreation]. *Sreda, okruzhayushchaya cheloveka: prirodnyaya, tekhnogennaya, sotsial'naya: mater. VI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, posvyashchennoy godu ekologii v Rossii* [Environment surrounding a person: natural, technogenic, social: mater. VI Intern. scientific-practical. conf. students, graduate students and young scientists dedicated to the year of ecology in Russia], Bryansk, April 26–28, 2017. Bryansk: Bryansk State Engineering and Technology University, 2017, pp. 73–76.
- [3] Lesovskaya S.G., Andreev Yu.A. *Rekreatsiya v razlichnykh tipakh lesa natsional'nogo parka «Valdayskiy»* [Recreation in various types of forests of the Valdaisky National Park]. *Sovremennye tendentsii v nauchnom i kadrovom obespechenii APK: mater. Vseros. nauch.-prak. konf. s mezhdunar. uchastiem* [Modern trends in the scientific and personnel support of the agro-industrial complex: mater. Vseros. scientific-practical conf. with international participation], Veliky Novgorod, November 28–29, 2019. Veliky Novgorod: Novgorod State University named after Yaroslav the Wise, 2020, pp. 260–265.
- [4] Volkov S.N., Borisov V.A., Fokina E.A. *Rekreatsionnye vozmozhnosti lesnykh nasazhdeniy Chaplyginskogo rayona Lipetskoy oblasti* [Recreational opportunities of forest plantations in the Chaplyginsky district of the Lipetsk region]. *International J. of Advanced Studies in Medicine and Biomedical Sciences* [International J. of Advanced Studies in Medicine and Biomedical Sciences], 2018, no. 1, pp. 77–91.
- [5] *Kadastrnyye svedeniya o natsional'nom parke «Valdayskiy» za 2013–2016 gg.* [Cadastral data on the Valdaisky National Park for 2013–2016]. Valday: FGBU Valdaisky National Park, 2017, 101 p.
- [6] *Prikaz ot 29 iyunya 2016 goda № 376 «Ob utverzhdeniya polozheniya o natsional'nom parke «Valdayskiy»»* [Order of June 29, 2016 No. 376 «On Approval of the Regulations on the Valdaisky National Park»]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/420366529> (accessed 09.02.2022).
- [7] Morozova O.V., Tsarevskaya N.G., Belonovskaya E.A. *Sosudistye rasteniya natsional'nogo parka «Valdayskiy» (annotirovanny spisok vidov): annotirovanny spisok vidov* [Vascular plants of the Valdaisky National Park (an annotated list of species): an annotated list of species]. Ed. V.S. Novikov. Moscow: Publishing House of the Commission of the Russian Academy of Sciences for the Conservation of Biological Diversity, 2010, 95 p.
- [8] Belonovskaya E.A., Kudryashova I.G., Tishkov A.A., Tsarevskaya N.G. *Razvitie turizma i riski invaziy chuzherodnykh rasteniy na territorii natsional'nogo parka «Valdayskiy»* [The development of tourism and the risks of invasions of alien plants on the territory of the national park «Valdaisky»]. *Ustoychivoe razvitie osobo okhranyaemykh prirodnykh territoriy: sb. statey VIII Vserossiyskoy (natsional'noy) nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sochi, 07–09 oktyabrya 2021 goda* [Sustainable development of specially protected natural areas: coll. articles of the VIII All-Russian (National) Scientific and Practical Conference], Sochi, October 07–09, 2021. Sochi: GKU of the Krasnodar Territory «Natural ornithological park in the Imeretinskaya lowland», 2021, pp. 61–70.
- [9] Belonovskaya E.A., Vinogradova V.V., Ponomarev M.A., Tishkov A.A., Tsarevskaya N.G. *Otsenka rekreatsionnogo potentsiala natsional'nogo parka «Valdayskiy»* [Assessment of the recreational potential of the Valdaisky National Park]. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya* [Izvestiya RAN. Geographic Series], 2019, no. 4, pp. 97–111.

- [10] Artaev O.N., Bashmakov D.I., Bezina O.V. *Metody polevykh ekologicheskikh issledovaniy* [Methods of field ecological researches]. Saransk: Publishing House of Mordovian University, 2014, 412 p.
- [11] Skarlygina-Ufimtseva M.D. *Metodicheskoe rukovodstvo po provedeniyu letney praktiki po botanicheskoy geografii* [Methodological guide for conducting summer practice in botanical geography]. Leningrad: Publishing house Leningrad University, 1968, 69 p.
- [12] Ipatov V.S., Mirin D.M. *Opisanie fitotsenoza* [Description of phytocenosis]. St. Petersburg: [b. i.], 2008, 71 p.
- [13] *Otraslevoy klassifikator sornykh rasteniy* [Branch classifier of weeds]. Moscow: FGBNU «Rosinformagrotech», 2018, 52 p.
- [14] Alekseev Yu.E., Vakhrameeva M.G., Denisova L.V., Nikitina S.V. *Lesnye travyanistyye rasteniya. Biologiya i okhrana: Spravochnik* [Forest herbaceous plants. Biology and protection: Handbook]. Moscow: Agropromizdat, 1988, 223 p.
- [15] OST 56-100-95 *Metody i edinitiy izmereniya rekreatsionnykh nagruzok na lesnye prirodnye komplekсы* [Methods and units of measurement of recreational loads on forest natural complexes]. Moscow, 1995, 8 p. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/471826617> (accessed 09.02.2022).
- [16] Kazanskaya N.S., Lanina V.V., Marfenin N.N. *Rekreatsionnye lesa (sostoyaniye, okhrana, perspektivy ispol'zovaniya)* [Recreational forests (state, protection, prospects for use)]. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1977, 96 p.
- [17] Chizhova V.P. *Rekreatsionnye landshafty: ustoychivost', normirovaniye, upravleniye* [Recreational landscapes: sustainability, regulation, management]. Smolensk: Oikumena, 2011, 176 p.
- [18] Burova N.V., Feklisov P.A. *Antropogennaya transformatsiya prigorodnykh lesov* [Anthropogenic transformation of suburban forests]. Arkhangelsk: Publishing House of the Arkhangelsk State Technical University, 2007, 264 p.
- [19] Sibgatullina M.Sh. *Rekreatsionnaya digressiya rastitel'nogo pokrova na territorii zakaznika «Golubye ozera»* [Recreational digression of vegetation cover on the territory of the Blue Lakes Reserve]. Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii [Russian Journal of Applied Ecology], 2015, no. 2(2), pp. 15–19.
- [20] Sibgatullina M.Sh. *Rekreatsionnaya digressiya rastitel'nogo pokrova na territorii zakaznika «Golubye ozera»* [Assessment of anthropotolerance of forest herbaceous plants]. Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii [Natural aspects of recreational use of the forest]. Moscow: Nauka, 1987, pp. 26–35.
- [21] Kuznetsov V.A. *Pochvy i rastitel'nost' parkovo-rekreatsionnykh landshaftov Moskvy* [Soils and vegetation of park and recreational landscapes of Moscow]. Dis. Cand. Sci. (Biol.) 03.02.13. Moscow, 2015, 170 p.
- [22] Kuchuk S.N., Yakovlev A.P. *Digressiya zhivogo napochvennogo pokrova lesnykh formatsiy sektora prirodnoy flory TsBS NAN Belarusi* [Digression of the living ground cover of forest formations of the natural flora sector of the Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus]. Problemy sokhraneniya biologicheskogo raznoobraziya i ispol'zovaniya biologicheskikh resursov: Mater. III mezhdunar. nauch.-prakt. konferentsii, posvyashchennoy 110-letiyu so dnya rozhdeniya akademika N.V. Smol'skogo [Problems of conservation of biological diversity and the use of biological resources: Mater. III intern. scientific-practical. conference dedicated to the 110th anniversary of Academician N.V. Smol'sky]. In 2 parts, Minsk, Belarus, 07–09 October 2015. Minsk: CJSC «Confido», 2015, pp. 119–121.
- [23] Yushkevich M.V., Petrashkevich A.A. *Transformatsiya zhivogo napochvennogo pokrova pri rekreatsionnom vozdeystvii* [Transformation of the living ground cover under recreational impact]. Tr. BGTU. Seriya 1: Lesnoe khozyaystvo, prirodopol'zovaniye i pererabotka vozobnovlyayemykh resursov [Tr. BSTU. Series 1: Forestry, nature management and processing of renewable resources], 2013, no. 1. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/transformatsiya-zhivogo-napochvennogo-pokrova-pri-rekreatsionnom-vozdeystvii> (accessed 09.02.2022).
- [24] Bednova O.V. *Metod indikatsii i otsenki rekreagennykh izmeneniy v lesnykh biogeotsenozakh* [The method of indication and evaluation of recreational changes in forest biogeocenoses]. Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik, 2013, no. 7, pp. 77–87.
- [25] Lysikov A.B. *Vliyaniye rekreatsii na sostoyaniye pochv v gorodskikh listvennykh lesakh* [Influence of recreation on the state of soils in urban deciduous forests]. Lesovedeniye, 2011, no. 4, pp. 11–20.

## Authors' information

**Terent'eva Oksana Sergeevna** ✉ — Master graduand of the Faculty of Applied and System Ecology, Russian State Hydrometeorological University, [ox.terentiewa2014@ya.ru](mailto:ox.terentiewa2014@ya.ru)

**Rokhlova Elena Leonidovna** — Cand. Sci. (Biology), Assistant Professor of the Faculty of Applied and System Ecology, Russian State Hydrometeorological University, [e.rohlova@rshu.ru](mailto:e.rohlova@rshu.ru)

**Khmel'shchikova Irina Gennadiyevna** — Senior Researcher, Valday National Park, [kudryashova.irena@gmail.com](mailto:kudryashova.irena@gmail.com)

Received 14.03.2022.

Approved after review 13.10.2022.

Accepted for publication 16.11.2022.

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

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОРБЦИОННО-СТИМУЛИРУЮЩИХ ПРЕПАРАТОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ СЕМЯН И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АЛЛЕЛОТОКСИНОВ ПОЧВ С РАСТЕНИЯМИ

**И.В. Горепекин**

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, Евразийский Центр по продовольственной безопасности МГУ

decembrist96@yandex.ru

Представлены материалы изучения влияния аллелотоксичности почв на эффективность применения сорбционно-стимулирующего препарата, используемого для предпосевной обработки семян. Проведено сравнение негативного воздействия на развитие семян аллелотоксичности почв и водных вытяжек из них. Анализ полученных результатов показал, что на развитие семян оказывают влияние только аллелотоксины, содержащиеся в почве в непосредственной близости от растений, поступающие в них, по-видимому, за счет обменной сорбции, что хорошо объясняет эффективность стимулирующей предпосевной обработки семян сорбционными препаратами, сорбционная емкость которых на несколько порядков меньше количества аллелотоксинов, содержащихся в почве. Выполнено сравнение действия сорбционно-стимулирующих препаратов при предпосевной обработке ими семян и при внесении больших количеств (в 30 раз) в почву. Установлено, что результат применения препаратов не зависит от способа их использования, что подтверждает правильность предложенного механизма взаимодействия аллелотоксинов почв с растениями. Анализ результатов внесения в почву сорбционно-стимулирующих препаратов позволил предположить существование в снижении аллелотоксичности почв микробиологического фактора, использование которого дало возможность значительно повысить эффективность применения сорбционно-стимулирующих препаратов.

**Ключевые слова:** стимуляция семян, поглощение растениями аллелотоксинов из почв, взаимодействие почвенных аллелотоксинов и стимуляторов

**Ссылка для цитирования:** Горепекин И.В. Использование сорбционно-стимулирующих препаратов для обработки семян и взаимодействие аллелотоксинов почв с растениями // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 1. С. 45–52. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-45-52

Стимулирующая предпосевная обработка семян известна достаточно давно [1–6]. Для ее проведения используют различные химические вещества, физические воздействия, а также биологические препараты.

Выдвинуто предположение [7] о том, что недостаточная эффективность подобных обработок связана с наличием в почвах аллелотоксинов [8–17], которые угнетающе действуют на растения и снижают эффект от применения стимуляторов и стимулирующих воздействий.

Предложена [7] обработка семян составами, содержащими сорбенты, поглощающие и закрепляющие аллелотоксины, а также стимуляторы, эффективность которых резко возрастает при минимизации сорбентами влияния аллелотоксинов на растения.

Следует отметить, что механизм действия сорбционных препаратов (СП) не был установлен. В соответствии с предложенной методикой обработки семян [7], высеваемых в 60 г почвы, расходовали около 18 мг СП (сухого вещества). В сельскохозяйственном производстве на одну зерновку

приходится примерно в 1000 раз больше почвы и, соответственно, аллелотоксинов. Маловероятно, что емкость сорбционного препарата позволит ограничить поступление аллелотоксинов.

Однако проведенные вегетационные опыты, в которых соотношение навесок «дерново-подзолистая почва : семена» было близко к реальным полевым условиям, свидетельствующие об эффективности обработки семян составом, содержащим наряду с сорбентом гиббереллин (рис. 1).

В контрольном образце из 20 семян проросло только 17 (обработанные семена проросли все), а наземная вегетативная масса проростков, выросших из обработанных семян, была почти на 40 % больше массы проростков, выросших в контроле (1,65 и 1,19 г). Это хорошо видно на фотографии (см. рис. 1).

### Цель работы

Цель работы — установление причины эффективности применения сорбционных препаратов для обработки семян и повышение стимулирующей способности этих препаратов на основе получения представлений о механизме их действия.



**Рис. 1.** Яровая пшеница сорта «Лиза», выросшая в дерново-подзолистой почве за 6 сут из необработанных (*a*) и обработанных сорбционно-стимулирующими препаратом семян (кальциевый бентонит — 40 г/дм<sup>3</sup>, гумат — 10 г/дм<sup>3</sup>, автолизат пивных дрожжей — 12 г/дм<sup>3</sup>, гиббереллин — 300 мг/дм<sup>3</sup> и полиэтиленгликоль с молекулярной массой 400–300 мг/дм<sup>3</sup>) с расходом 60 дм<sup>3</sup> суспензии препарата на 1 т семян (*б*)

**Fig. 1.** Spring wheat «Liza», grown in soddy-podzolic soil for 6 days from untreated (*a*) and treated with a sorption-stimulating preparation of seeds (calcium bentonite — 40 g/dm<sup>3</sup>, humate — 10 g/dm<sup>3</sup>, brewer's yeast autolysate — 12 g/dm<sup>3</sup>, gibberellin — 300 mg/dm<sup>3</sup> and polyethylene glycol with a molecular weight of 400–300 mg/dm<sup>3</sup>) with a consumption of 60 dm<sup>3</sup> of the preparation suspension per 1 ton of seeds (*b*)

## Объекты и методы исследования

В экспериментах использовали семена яровой пшеницы (*Triticum*) сортов «Лиза», «Любава», «Злата», «Агата» и «Эстер», озимой пшеницы (*Triticum*) сортов «Московская-56» и «Немчиновская-17», ярового ячменя (*Hordeum*) сортов «Владимир», «Эльф», «Московский-86», «Златояр», «Яромир» и озимой ржи (*Secale*) сортов «Татьяна», «Московская-12» и «Московская-15».

Проращивали семена в образцах дерново-подзолистой почвы: агродерново-глубокоподзолистой легкосуглинистой на водно-ледниковых (древнеозерных) отложениях почвы (высушенная увлажненная (ВУ)), исходная (И) и автоклавированная (Авт), подстилаемая с глубины 92 см бескарбонатными лёссовидными (покровными) суглинками (окрестности поймы р. Яхрома, Московская обл.). Индекс ВУ означает, что почвенный образец готовили общепринятым в почвоведении способом — после отбора образца его доводили до воздушно-сухого состояния. Для получения из него увлажненного образца добавляли воду при тщательном перемешивании

и выдерживали в таком состоянии не менее двух недель. Индекс И означает, что отобранный образец, содержащий влагу, хранили при комнатной температуре, поддерживая его увлажненное состояние. Индекс Авт означает, что образец исходной почвы автоклавировали при избыточном давлении 0,46 Мпа в течение 2 ч. Такая пробоподготовка позволяла получать из имеющегося образца дерново-подзолистой почвы образцы с сильно отличающейся аллелотоксичностью. При этом содержание элементов питания в образцах почв оставалось неизменным, что позволяло исключить влияние этого фактора на развитие семян.

Для И-образца почвы аллелотоксичность составляла +27 % — почва стимулировала развитие семян, ВУ-образцы почвы угнетали развитие семян на 23 % (аллелотоксичность — 23 %), Авт-образцы почвы угнетали развитие семян на 77 % (аллелотоксичность — 77 %).

Для защитного действия семян от почвенных аллелотоксинов использовали гумат калия (Г), произведенный ООО НВЦ «Агротехнологии» (Россия) из бурого угля, и бентонит кальция (БК) по ОСТ 18-49-71 (Россия), к которым добавляли автолизат пивных дрожжей (АПД), произведенный ООО «Биотех плюс» (Россия). Применяли суспензии сорбционного препарата, содержащие БК — 40 г/дм<sup>3</sup>, Г — 10 г/дм<sup>3</sup>, АПД — 12 г/дм<sup>3</sup>. В качестве биологически активных веществ к компонентам сорбционного препарата добавляли 90%-й гиббереллин (Китай) в концентрации 300 мг/дм<sup>3</sup> и полиэтиленгликоль (ПЭГ) с молекулярной массой 400 у. е. в концентрации 300 мг/дм<sup>3</sup>. Данный 5-компонентный препарат назвали ССП-5 (сорбционно-стимулирующий препарат пятикомпонентный). Также при изготовлении ССП-6 в состав ССП-5 добавляли сахарозу.

Обработку семян проводили полусухим способом при расходе 40...60 дм<sup>3</sup> раствора (суспензии) препарата на 1 т семян.

Образцы почв готовили, внося в них необходимое количество добавок, тщательно перемешивая и оставляя на 3 сут. После этого проводили посев семян в образцы почв.

Вытяжки из образцов почв готовили, добавляя к ним воду из расчета 170 г воды на 200 г абсолютно сухой почвы, перемешивали в течение 20 мин и отделяли почвенный раствор центрифугированием при 4000 об/мин. Полученные вытяжки добавляли в песок (15 г вытяжки на 60 г песка), в который высевали 7,5 г семян. Такое соотношение между водой и песком обеспечивает оптимальные водно-воздушные условия для развития семян [18].

Изучали изменение интегральной длины проростков 7,5 г семян (~200 шт.), которую определяли, используя экспресс-метод биотестирования,

основанный на существовании линейной зависимости между насыпным объемом проросших семян в воде и длиной их проростков [18]. Биотестирование на данный момент считается единственным методом, пригодным для изучения аллелотоксичности почв [10]. Связано это с тем, что, даже зная концентрации сотен аллелотоксинов, которые могут содержаться в почвах, невозможно предсказать эффект от их совместного действия вследствие взаимного влияния аллелотоксинов друг на друга и разной степени их закрепления в почвах.

Для определения воздействия почв на развитие семян (аллелотоксичности почв) проводили сравнительные испытания по развитию проростков семян в песке и почвах. При проведении этих экспериментов принимали за 100 % развитие семян в песке и рассчитывали относительно полученного значения замедление или ускорение развития проростков семян почвой.

Применяли шестикратную повторность с последующей статистической обработкой результатов. Таким образом, в одном опыте использовали 1000...1200 семян, а доверительный интервал не превышал 15 %.

## Результаты и обсуждение

Для выяснения причины эффективности применения для обработки семян ССП провели ряд экспериментов. Во-первых, было изучено влияние аллелотоксичности почв на прорастание семян пшеницы и развитие из них растений сортов «Лиза» и «Любава» (рис. 2). Во-вторых, сравнили влияние на прорастание семян аллелотоксичности почв и вытяжек из почв (табл. 1). В-третьих, оценили действие ССП при обработке ими семян и при внесении их в почву (табл. 2).

По представленным на рис. 2 данным хорошо видно, что эффективность действия ССП-5 с ростом аллелотоксичности почвенных образцов снижается, что не совпадает с ранее полученными результатами [7]. В составе ССП-5 были гумат и бентонит кальция, эффект от применения которого возрастал с ростом аллелотоксичности почв. Однако необходимо учесть, что в работе [7] представлены результаты изучения влияния аллелотоксичности почв на действие препарата БК-Г со значительно большей сорбционной емкостью. Введение в этот препарат дополнительных трех компонентов (АПД, ПЭГ и гиббереллина), состоящих в основном из органических низкомолекулярных веществ, должно значительно снизить его остаточную сорбционную емкость. По-видимому, ее было недостаточно для закрепления аллелотоксинов, поступающих из почв при росте их аллелотоксичности, что привело к снижению эффективности применения ССП-5.

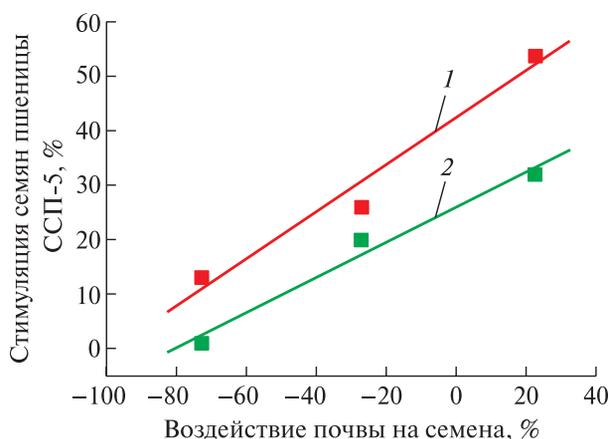


Рис. 2. Влияние аллелотоксичности образцов дерново-подзолистого почвенного горизонта на действие стимулятора ССП-5 при обработке им семян яровой пшеницы сортов «Лиза» (1) и «Любава» (2) при расходе препарата 40 л/дм<sup>3</sup> семян

Fig. 2. Influence of allelotoxicity of samples of soddy-podzolic soil on the effect of the SSP-5 stimulant when it is treated with seeds of spring wheat «Liza» (1) and «Lyubava» (2) at a preparation consumption of 40 l/dm<sup>3</sup> of seeds

Т а б л и ц а 1

### Аллелотоксичность образцов почв и водных вытяжек из почвенных образцов, определенная на яровой пшенице сорта «Лиза»

#### Allelotoxicity of soil samples and water extracts from soil samples, determined on spring wheat variety «Liza»

Почвенный образец	Аллелотоксичность почв, %	Аллелотоксичность вытяжек, %
Исходная (И)	+23 ± 3	-23 ± 3
Высушенная-увлажненная (ВУ)	-27 ± 3	-15 ± 2
Автоклавированная (Авт)	-77 ± 6	-24 ± 3

Т а б л и ц а 2

### Действие сорбционно-стимулирующих препаратов на снижение негативного влияния аллелотоксичности почв на яровую пшеницу сорта «Лиза»

#### The effect of sorption-stimulating preparations on reducing the negative impact of soil allelotoxicity on spring wheat variety «Liza»

Состав препарата	Обработка семян, %	Внесение в почву*, %
БК-Г	25 ± 3	20 ± 2
БК-Г-ПЭГ	20 ± 2	16 ± 2
БК-Г-АПД	32 ± 3	34 ± 3

Примечание. \*При добавлении в почву использовали в 30 раз большее количество препарата в сравнении с предпосевной обработкой.

Исходя из полученных данных, можно предположить, что при использовании препарата ССП-5 для обработки семян перед их посевом в дерново-подзолистую ВУ-почву сорбционная емкость препарата становится сравнимой с содержанием аллелотоксинов почв, которые могут ингибировать развитие семян и которые необходимо закрепить. Отметим, что на обработку 7,5 г (~200 шт.) семян применяли 18 мг сухого препарата, и после проведения вегетационных опытов их высевали в 20 кг почвы. В соответствии с классической работой по аллелопатии [10] почвенные растворы, вызывающие угнетение растений, должны содержать 500...1000 мг/дм<sup>3</sup> аллелотоксинов (в пересчете на кумарин). Учитывая влажность исследуемых почв — около 20 % — в 20 кг почвы, только в почвенном растворе должно содержаться ориентировочно 1500...4000 мг аллелотоксинов. Считается [10], что в почвенных растворах содержится лишь небольшая часть аллелотоксинов, которые находятся в почвах. Вполне очевидно, что 18 мг сорбционного препарата не могут закрепить или значимо повлиять на активность такого количества аллелотоксинов, обеспечивая этим стимуляцию прорастания семян и развитие их проростков. Наличие стимулирующего эффекта однозначно свидетельствует о том, что для снижения негативного влияния аллелотоксичности почв на растения на сорбционном препарате необходимо закрепить небольшое количество аллелотоксинов, и, следовательно, только небольшая часть аллелотоксинов, содержащихся в почвах может оказывать ингибирующее влияние на прорастание семян и развитие их проростков.

Исходя из сравнения аллелотоксичности почв и вытяжек из почв (см. табл. 1) следует, что почва оказывает стимулирующее воздействие на семена, в то время как вытяжка из этой почвы ингибирует развитие семян.

По-видимому, подобный результат объясняется тем, что стимулирующие биологически активные вещества (БАВ) не переходят в вытяжку, а из почв в семена (растения) поступают за счет обменных реакций сорбции [10] — растения выделяют вещества, которые замещают сорбированные БАВ, после чего последние поступают в растения.

Учитывая, что растения поглощают из почв обе группы веществ — БАВ и аллелотоксины [10], можно считать, что измеряемая аллелотоксичность почв представляет собой результирующую характеристику действия БАВ и аллелотоксинов.

Принимая во внимание, что в дерново-подзолистой почве при ее высушивании или автоклавировании стимулирующие БАВ не будут распадаться, а должны сохраняться и далее погло-

щаться растениями, повышение аллелотоксичности может свидетельствовать о переходе дополнительных больших количеств аллелотоксинов из недоступного состояния в доступную для растений форму, обеспечивая 50%-й рост аллелотоксичности для ВУ-почвы и 100%-й рост аллелотоксичности для автоклавированной почвы (см. табл. 1).

Учитывая, что стимулирующие БАВ в основном не переходят в вытяжку, можно предположить, что рост аллелотоксичности вытяжек должен быть намного больше того, который наблюдается. Оценочные расчеты показывают, что аллелотоксинов в вытяжках при условии их полного перехода из почв в вытяжки в условиях проведения экспериментов должно быть примерно в 3 раза больше — они должны оказывать в 3 раза больший эффект при проращивании семян в песке с добавлением вытяжек по сравнению с их проращиванием в образцах почв. Следовательно, для вытяжек из ВУ-почвы аллелотоксичность должна быть –40 %, а не –15 %, а для Авт-почвы — –56 %, а не –24 %. Несмотря на ряд предположений, использованных при анализе результатов сравнения аллелотоксичности почв и вытяжек из почв, это является дополнительным подтверждением того, что в почвенных растворах в доступном для растений состоянии содержится значительно меньше аллелотоксинов, чем в почвах.

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Не все аллелотоксины из почвы могут поступать в зерновку и развивающиеся растения, а только находящиеся в почвах в активном состоянии. Высушивание-увлажнение и автоклавирование обеспечивают переход большего количества аллелотоксинов, находящихся в почве, в активное состояние. К активному состоянию аллелотоксинов, по-видимому, следует отнести нахождение аллелотоксинов в растворенном состоянии в почвенном растворе и в сорбированном состоянии на почвенных частицах. Наличие механизма прочного закрепления аллелотоксинов в почве, когда они не доступны растениям, следует из экспериментальных данных и не вызывает сомнений, однако он пока неясен и требует изучения.

2. Меньший выход аллелотоксинов в вытяжки из почв по сравнению с ожидаемым связан, вероятно, с поглощением растениями аллелотоксинов в основном непосредственно из почвы, а не из почвенного раствора, вследствие обменных реакций и выделения веществ, вытесняющих аллелотоксины из почв.

3. Стимулирующее действие сорбционных стимуляторов на семена связано, на наш взгляд, с небольшим расстоянием, на котором эффективно

могут проявлять себя процессы обменной адсорбции (обменной сорбции).

Из перечисленных предположений о механизме поступления аллелотоксинов из почв в семена и развивающиеся растения следует, во-первых, что для стимуляции растений необходимо, чтобы СП могли закреплять аллелотоксины, находящиеся в почве в непосредственной близости от растительных объектов. Во-вторых, если эффект при использовании СП для обработки семян на почвах с более высокой аллелотоксичностью снижается, то должно быть достаточно некоторого увеличения дозы препарата для обеспечения поглощения аллелотоксинов, находящихся в почве вблизи зерновок.

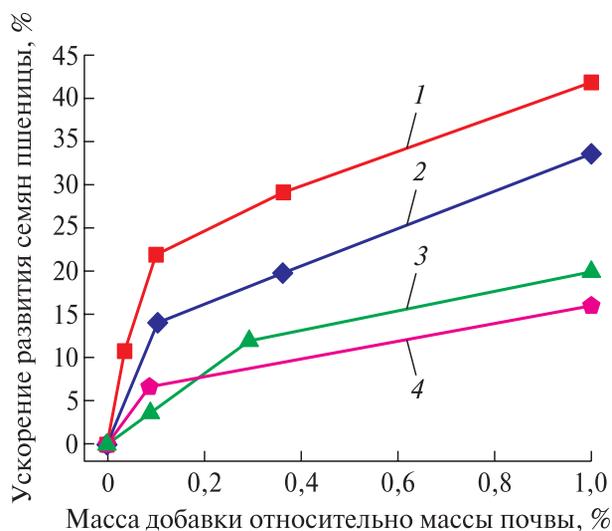
Последний вывод подтвержден экспериментально. Увеличение расхода ССП-5 при обработке им семян яровой пшеницы сорта «Лиза» с 40 до 60  $\text{дм}^3/\text{т}$  семян привело на дерново-подзолистой ВУ-почве к значительному повышению эффективности применения ССП-5 — с 25 до 50 %, т. е. эффект возрос практически до величины, наблюдаемой на образцах исходной почвы.

Из сравнения действия ССП при обработке ими семян и при внесении их в почву (см. табл. 2) следует, что значимая разница между эффективностью препарата в обоих случаях отсутствует. Это значит, что использование на обработку семян в 30 раз меньшего количества препарата, чем при внесении в почву, дает примерно равный эффект, — еще одно подтверждение приведенного выше объяснения о поступлении аллелотоксинов в семена и растения вследствие обменной адсорбции из почвенных частиц, примыкающих к семенам. Поэтому внесение в почву большого количества СП при их равномерном распределении в почве оказывает на стимуляцию развития семян такое же влияние, как и создание сорбционного барьера вокруг семян.

Для получения дополнительной информации по механизму действия ССП проведены эксперименты по изучению влияния внесения в почву различных сорбентов на их аллелотоксичность (рис. 3).

По полученным данным можно подвести следующий итог:

- добавка к почве сорбционного препарата, состоящего из бентонита кальция (БК) с гуматом (Г), снижает аллелотоксичность почв (см. рис. 3, 3);
- введение в сорбционный препарат БК-Г полиэтиленгликоля (ПЭГ) не оказывает значимого влияния на действие препарата БК-Г (см. рис. 3, 4);
- введение в сорбционный препарат БК-Г автолизата пивных дрожжей (АПД) заметно усиливает действие препарата БК-Г (рис. 3, 2);
- добавление ПЭГ к сорбционному препарату БК-Г-АПД усиливает его действие (см. рис. 3, 1);
- внесение в почву одного АПД в количестве, содержащемся в препарате БК-Г-АПД при его



**Рис. 3.** Зависимость изменения аллелотоксичности дерново-подзолистой ВУ-почвы от внесения различного количества сорбционно-стимулирующих препаратов на примере семян яровой пшеницы сорта «Лиза»: 1 — бентонит кальция — гумат — автолизат пивных дрожжей — полиэтиленгликоль; 2 — бентонит кальция — гумат — автолизат пивных дрожжей; 3 — бентонит кальция — гумат; 4 — бентонит кальция — гумат — полиэтиленгликоль

**Fig. 3.** Dependence of the change in the allelotoxicity of the soddy-podzolic VU-soil on the introduction of various amounts of sorption-stimulating preparations on the example of spring wheat seeds «Liza»: 1 — calcium bentonite — humate — brewer's yeast autolysate — polyethylene glycol; 2 — calcium bentonite — humate — brewer's yeast autolysate; 3 — calcium bentonite — humate; 4 — calcium bentonite — humate — polyethylene glycol

добавлении к почве в количестве 1 %, ингибирует развитие семян примерно на 20 %.

Согласно полученным результатам, можно прийти к заключению, что действие СП основано не только на сорбции аллелотоксинов из почвы. Об этом свидетельствует, во-первых, отсутствие положительного влияния добавления ПЭГ к препарату БК-Г, который уменьшает размеры его частиц [19] и, следовательно, должен увеличивать его поверхность и сорбционную емкость. Во-вторых, введение в СП (БК-Г) АПД, ингибирующего развитие семян и, согласно своему составу [20, 21], закрепляющегося на сорбенте, должно уменьшать сорбционную емкость препарата БК-Г и, как следствие, снижать эффективность его действия, а значит, усиливать снижение аллелотоксичности почвы. В-третьих, введение ПЭГ в препарат БК-Г-АПД, который не оказал влияния на эффективность препарата БК-Г, усиливает его действие.

Из изложенного выше следует, что в проведенных экспериментах:

- проявляются эмерджентные свойства препаратов, которые действуют не как смесь отдельных компонентов, а как единая система, обладающая новыми свойствами;

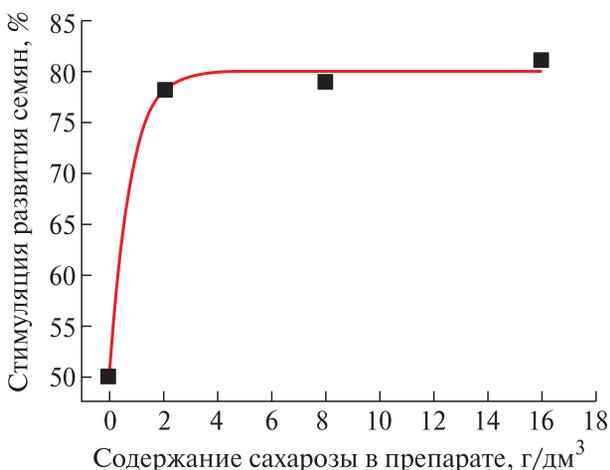


Рис. 4. Эффективность стимуляции прорастания семян при добавлении сахарозы к ССП-5 и развитие из них растений яровой пшеницы сорта «Лиза»

Fig. 4. Efficiency of stimulation of seed germination with the addition of sucrose to SSP-5 and the development of spring wheat plants of «Liza»

### Т а б л и ц а 3

#### Предпосевная обработка ССП-5 и ССП-6 семян различных культур и сортов и ее влияние на стимуляцию прорастания и начальную фазу развития растений, произрастающих на дерново-подзолистой почве

#### Pre-sowing treatment of SSP-5 and SSP-6 seeds of various crops and varieties and its effect on the stimulation of germination and the initial phase of development of plants growing on soddy-podzolic soil

Культура	Сорт	Стимуляция на исходной дерново-подзолистой почве, %	Стимуляция на дерново-подзолистой ВУ-почве, %
Яровая пшеница	Лиза	56 ± 5	80 ± 7
	Любава	32 ± 3	–
	Злата	33 ± 4	–
	Агата	4 ± 2	–23 ± 3
Яровой ячмень	Эстер	3 ± 2	–
	Злагояр	17 ± 2	–
	Эльф	–4 ± 2	31 ± 3
	Яромир	25 ± 3	–
	Московский-86	31 ± 4	–
Озимая пшеница	Владимир	28 ± 3	–
	Московская-56	21 ± 2	–
Озимая рожь	Немчиновская-17	24 ± 3	–
	Московская-15	11 ± 2	9 ± 2
	Московская-12	15 ± 2	–
	Татьяна	15 ± 2	–

– речь идет уже не только об изменении сорбционных свойств вносимых в почву препаратов; – внесение в почву в достаточно больших количествах СП делает заметным существование не только сорбционного, но и другого, по-видимому, микробиологического фактора, который не был учтен в исследованиях по обработке семян ССП.

Для проверки влияния микробиологического фактора в действии ССП в состав ССП-5 добавили сахарозу, которая должна была усилить развитие микроорганизмов в областях почвы, примыкающих к семенам, и могла оказать влияние на эффективность действия препарата.

Полученные результаты (рис. 4) подтвердили изложенные предположения. Добавление в ССП сахарозы в качестве шестого компонента более чем в 1,5 раза повысило эффективность его действия. Однако механизм влияния микроорганизмов на эффективность действия ССП пока не известен. Требуется дальнейшее тщательное изучение этого вопроса.

Проверка эффективности препарата, проведенная на других сортах и культурах зерновых, показала, что задействование микробиологического фактора значительно повышает универсальность препарата ССП-6 по сравнению с ССП-5 (табл. 3). Из 15 изученных сортов и культур семян зерновых обработка ССП-5 оказалась эффективна (стимуляция более 20 %) только для половины из них, а обработка ССП-6 — для подавляющего большинства.

Таким образом, выдвинутые для объяснения полученных экспериментальных результатов предположения позволили более чем в 3 раза увеличить эффективность использования ССП для предпосевной обработки семян яровой пшеницы сорта «Лиза», а также дали возможность значительно повысить универсальность препарата — эффективность его применения на большом числе зерновых культур. На яровой пшенице сорта «Лиза» на дерново-подзолистой ВУ-почве эффект стимуляции при обработке ССП-5 при расходе 40 дм<sup>3</sup>/т семян составил 25 % (см. рис. 2). Для этого же сорта на дерново-подзолистой ВУ-почве при обработке ССП-6 при расходе 60 дм<sup>3</sup>/т семян эффект составил 80 %.

### Список литературы

- [1] Алтухов И.В., Федотов В.А. Воздействие ИК-излучения различных длин волн на семена пшеницы // Ползуновский вестник, 2011. № 2/1. С. 156–159.
- [2] Дмитриев А.М., Страцкевич Л.К. Стимуляция роста растений / под ред. Н.Ф. Батыгина. Минск: Ураджай, 1986. 118 с.
- [3] Кравец А.В., Бобровская Д.Л., Касимова Л.В., Зотикова А.П. Предпосевная обработка семян яровой пшеницы гуминовым препаратом из торфа // Вестник Алтайского государственного аграрного университета, 2011. № 4 (78). С. 22–24.

- [4] Рябчинская Т.А., Харченко Г.Л., Саранцева Н.А., Бобрешова И.Ю., Злотников А.К. Полифункциональное действие препарата Альбит при предпосевной обработке семян яровой пшеницы // *Агрохимия*, 2009. № 10. С. 39–47.
- [5] Сечняк Л.К., Киндрук Н.А., Слюсаренко О.К., Иващенко В.Г., Кузнецов Е.Д. Экология семян пшеницы. М.: Колос, 1983. 349 с.
- [6] Balakhina T., Bulak P., Nosalewicz M., Pietruszewski S. The influence of wheat *Triticum aestivum* L. seed pre-sowing treatment with magnetic fields on germination, seedling growth, and antioxidant potential under optimal soil watering and flooding // *Acta physiologiae plantarum*, 2015, Vol. 37, no. 3, p. 59.
- [7] Федотов Г.Н., Шоба С.А., Горепекин И.В. Аллелотоксичность почв и способ уменьшения ее негативного влияния на начальную стадию развития растений // *Почвоведение*, 2020, № 8. С. 1007–1015.
- [8] Берестецкий О.А. Фитотоксины почвенных микроорганизмов и их экологическая роль // Фитотоксические свойства почвенных микроорганизмов. Л.: ВНИИСХМ, 1978. С. 7–30.
- [9] Гродзинский А.М. Аллелопатия растений и почвоутомление. Киев: Наукова думка, 1991. 432 с.
- [10] Гродзинский А.М., Богдан Г.П., Головки Э.А., Дзюбенко Н.Н., Мороз П.А., Прутенская Н.И. Аллелопатическое почвоутомление. Киев: Наукова думка, 1979. 248 с.
- [11] Красильников Н.А. Микроорганизмы почвы и высшие растения. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 464 с.
- [12] Лобков В.Т. Использование почвенно-биологического фактора в земледелии. Орел: Изд-во Орловского ГАУ, 2017. 166 с.
- [13] Allelopathy. A Physiological Process with Ecological Implications. Edited by M.J. Reigosa, N. Pedrol and L. Gonzalez. Published by Springer. Printed in the Netherlands, 2006. 637 p.
- [14] Cheng F., Cheng Z. Research Progress on the use of Plant Allelopathy in Agriculture and the Physiological and Ecological Mechanisms of Allelopathy // *Frontiers in Plant Science*, 2015, v. 6, p. 1020.
- [15] Ghulam J., Shaukat M., Arshad N.C., Imran H., Muhammad A. Allelochemicals: sources, toxicity and microbial transformation in soil – a review // *Annals of Microbiology*, 2008, v. 58 (3), pp. 351–357.
- [16] McCalla T.M., Haskins F.A. Phytotoxic Substances from Soil Microorganisms and Crop Residues // *Bacteriological Reviews*, 1964, v. 28, pp. 181–207.
- [17] Rice E.L. Allelopathy. New York: Academic Press, 1984. 422 p.
- [18] Федотов Г.Н., Шоба С.А., Федотова М.Ф., Горепекин И.В. Влияние аллелотоксичности почв на прорастание семян зерновых культур // *Почвоведение*, 2019. № 4. С. 489–496.
- [19] Шоба С.А., Горепекин И.В., Федотов Г.Н., Грачева Т.А., Салигареева О.А. Природа повышения эффективности применения сорбционно-стимулирующих препаратов для предпосевной обработки семян при введении в их состав неионогенных ПАВ // *Доклады Российской академии наук. Науки о жизни*, 2020. Т. 494. С. 513–516.
- [20] Федосова А.А. Автолизат пивных дрожжей в кормлении цыплят-бройлеров кросса Конкурент-3: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Москва, 2009. 21 с.
- [21] Чичина Т.В. Разработка технологии белковых ингредиентов на основе остаточных пивных дрожжей с использованием холодильной обработки: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2014. 126 с.

## Сведения об авторе

**Горепекин Иван Владимирович** — ведущий инженер Евразийского центра по продовольственной безопасности МГУ, [decembrist96@yandex.ru](mailto:decembrist96@yandex.ru)

Поступила в редакцию 16.05.2022.

Одобрено после рецензирования 28.09.2022.

Принята к публикации 30.11.2022.

## USE OF SORPTION-STIMULATING PREPARATIONS FOR SEED TREATMENT AND INTERACTION OF SOIL ALLELOTOXINS WITH PLANTS

**I.V. Gorepekin**

M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science, GSP-1, 1, p. 12, Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russia  
[decembrist96@yandex.ru](mailto:decembrist96@yandex.ru)

The influence of soil allelotoxicity on the application efficiency of a sorption-stimulating preparation used for pre-sowing seed treatment was studied. A comparison was also made of the negative effects of allelotoxicity of soils and water extracts from these soils on the seed development. From the analysis of the results, it followed that the development of seeds is influenced only by allelotoxins contained in the soil in the immediate vicinity of plants, entering them, apparently, due to exchange sorption. This mechanism of interaction of soil allelotoxins with plants explains well the effectiveness of stimulating pre-sowing seed treatment with sorption preparations, the sorption capacity of which is several orders of magnitude less than the amount of allelotoxins contained in the soil. A comparison was made that effect of sorption-stimulating preparations during the pre-sowing treatment of seeds and when introducing into the soil 30 times larger quantities. It was found that result of the preparations use does not depend on the method of their application, which confirms the correctness of the proposed mechanism of interaction between soil allelotoxins and plants. Results analysis of the introduction into the soil the sorption-stimulating preparations suggested the existence of a microbiological factor in reducing the allelotoxicity of soils, the use of which made it possible to significantly increase the effectiveness of the sorption-stimulating preparations.

**Keywords:** seed stimulation, plant uptake of allelotoxins from soils, interaction of soil allelotoxins and stimulants

**Suggested citation:** Gorepekin I.V. *Ispol'zovanie sorbtionno-stimuliruyushchikh preparatov dlya obrabotki semyan i vzaimodeystvie allelotoksinov pochv s rasteniyami* [Use of sorption-stimulating preparations for seed treatment and interaction of soil allelotoxins with plants]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 1, pp. 45–52. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-45-52

## References

- [1] Altukhov I.V., Fedotov V.A. *Vozdeystvie IK-izlucheniya razlichnykh dlin voln na semena pshenitsy* [The impact of IR radiation of various wavelengths on wheat seeds]. *Polzunovskiy vestnik*, 2011, no. 2/1, pp. 156–159.
- [2] Dmitriev A.M., Stratskevich L.K. *Stimulyatsiya rosta rasteniy* [Stimulation of plant growth]. Ed. N.F. Batygin. Minsk: Urjay, 1986, 118 p.
- [3] Kravets A.V., Bobrovskaya D.L., Kasimova L.V., Zotikova A.P. *Predposevnaya obrabotka semyan yarovoy pshenitsy guminovym preparatom iz torfa* [Pre-sowing treatment of spring wheat seeds with a humic preparation from peat]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Altai State Agrarian University], 2011, no. 4 (78), pp. 22–24.
- [4] Ryabchinskaya T.A., Kharchenko G.L., Sarantseva N.A., Bobreshova I.Yu., Zlotnikov A.K. *Polifunktsional'noe deystvie preparata Al'bit pri predposevnoy obrabotke semyan yarovoy pshenitsy* [Polyfunctional effect of Albit preparation during presowing treatment of spring wheat seeds]. *Agrokhiimiya* [Agrochemistry], 2009, no. 10, pp. 39–47.
- [5] Sechnyak L.K., Kindruk N.A., Slyusarenko O.K., Ivashchenko V.G., Kuznetsov E.D. *Ekologiya semyan pshenitsy* [Ecology of wheat seeds]. Moscow: Kolos, 1983, 349 p.
- [6] Balakhina T., Bulak P., Nosalewicz M., Pietruszewski S. The influence of wheat *Triticum aestivum* L. seed pre-sowing treatment with magnetic fields on germination, seedling growth, and antioxidant potential under optimal soil watering and flooding. *Acta physiologiae plantarum*, 2015, v. 37, no. 3, p. 59.
- [7] Fedotov G.N., Shoba S.A., Gorepekin I.V. *Allelotoksichnost' pochv i sposob umen'sheniya ee negativnogo vliyaniya na nachal'nyuyu stadiyu razvitiya rasteniy* [Soil allelotoxicity and a way to reduce its negative impact on the initial stage of plant development]. *Pochvovedenie* [Soil Science], 2020, no. 8, pp. 1007–1015.
- [8] Berestetskiy O.A. *Fitotoksiny pochvennykh mikroorganizmov i ikh ekologicheskaya rol'* [Phytotoxins of soil microorganisms and their ecological role]. *Fitotoksicheskie svoystva pochvennykh mikroorganizmov* [Phytotoxic properties of soil microorganisms]. Leningrad: VNIISHM, 1978, pp. 7–30.
- [9] Grodzinskiy A.M. *Allelopatiya rasteniy i pochvoutomlenie* [Plant allelopathy and soil fatigue]. Kyiv: Naukova Dumka, 1991, 432 p.
- [10] Grodzinskiy A.M., Bogdan G.P., Golovko E.A., Dzyubenko N.N., Moroz P.A., Prutenskaya N.I. *Allelopaticheskoe pochvoutomlenie* [Allelopathic soil fatigue]. Kyiv: Naukova Dumka, 1979, 248 p.
- [11] Krasil'nikov N.A. *Mikroorganizmy pochvy i vysshie rasteniya* [Soil microorganisms and higher plants]. Moscow: AN SSSR, 1958, 464 p.
- [12] Lobkov V.T. *Ispol'zovanie pochvenno-biologicheskogo faktora v zemledelii* [The use of the soil-biological factor in agriculture]. Orel: Publishing House of the Orlovsky State Agrarian University, 2017, 166 p.
- [13] Allelopathy. A Physiological Process with Ecological Implications. Edited by M.J. Reigosa, N. Pedrol and L. Gonzalez. Published by Springer. Printed in the Netherlands, 2006, 637 p.
- [14] Cheng F., Cheng Z. Research Progress on the use of Plant Allelopathy in Agriculture and the Physiological and Ecological Mechanisms of Allelopathy. *Frontiers in Plant Science*, 2015, v. 6, p. 1020.
- [15] Ghulam J., Shaikat M., Arshad N.C., Imran H., Muhammad A. Allelochemicals: sources, toxicity and microbial transformation in soil — a review. *Annals of Microbiology*, 2008, v. 58 (3), pp. 351–357.
- [16] McCalla T.M., Haskins F.A. Phytotoxic Substances from Soil Microorganisms and Crop Residues. *Bacteriological Reviews*, 1964, v. 28, pp. 181–207.
- [17] Rice E.L. Allelopathy. New York: Academic Press, 1984, 422 p.
- [18] Fedotov G.N., Shoba S.A., Fedotova M.F., Gorepekin I.V. *Vliyanie allelotoksichnosti pochv na prorastanie semyan zernovykh kul'tur* [Influence of soil allelotoxicity on the germination of seeds of grain crops]. *Pochvovedenie* [Soil Science], 2019, no. 4, pp. 489–496.
- [19] Shoba S.A., Gorepekin I.V., Fedotov G.N., Gracheva T.A., Saligareeva O.A. *Priroda povysheniya effektivnosti primeneniya sorbtionno-stimuliruyushchikh preparatov dlya predposevnoy obrabotki semyan pri vvedenii v ikh sostav neionogennykh PAV* [The nature of increasing the efficiency of the use of sorption-stimulating preparations for presowing treatment of seeds with the introduction of nonionic surfactants into their composition]. *Doklady Rossiyskoy akademii nauk. Nauki o zhizni* [Reports of the Russian Academy of Sciences. Life Sciences], 2020, v. 494, pp. 513–516.
- [20] Fedosova A.A. *Avtolizat pivnykh drozhzhey v kormlenii tsyplyat-broylerov krossa Konkurent-3* [Autolysate of brewer's yeast in feeding broiler chickens of the Competitor-3 cross-country]. *Diss. Cand. Sci (Biol.)*. Moscow, 2009, 21 p.
- [21] Chichina T.V. *Razrabotka tekhnologii belkovykh ingredientov na osnovе ostatochnykh pivnykh drozhzhey s ispol'zovaniem kholodil'noy obrabotki* [Development of technology of protein ingredients based on residual brewer's yeast using refrigeration]. *Diss. Cand. Sci. (Tech.)*. St. Petersburg, 2014, 126 p.

## Author's information

**Gorepekin Ivan Vladimirovich** — Leading Engineer of the Eurasian Center for Food Security of Lomonosov Moscow State University, [decembrist96@yandex.ru](mailto:decembrist96@yandex.ru)

Received 16.05.2022.

Approved after review 28.09.2022.

Accepted for publication 30.11.2022.

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ФУНГИЦИДА «АЗОРРО, КС» ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ СЕЯНЦЕВ ДУБА ЧЕРЕШЧАТОГО В УСЛОВИЯХ ОТКРЫТОГО И ЗАКРЫТОГО ГРУНТА

И.Р. Тазиев<sup>1</sup>, А.Р. Мухаметшина<sup>1✉</sup>, Г.А. Петрова<sup>1</sup>, Н.М. Тазмеев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет», 420015, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 65

<sup>2</sup>ГКУ «Кзыл-Юлдузское лесничество», 422667, Россия, Республика Татарстан, Рыбно-Слободский район, с. Кзыл-Юлдузский Лесхоз, ул. Парковая

aigulsafina@yandex.ru

Актуальной на сегодняшний день в Республике Татарстан является проблема деградации дубрав, которые образуют крупные массивы и являются наиболее ценными. Площадь дубовых насаждений с каждым годом сокращается в связи с повреждениями вследствие морозов 1978–1979 гг., поэтому с гибелью дуба увеличиваются площади осиновых, липовых и березовых насаждений. Восстановление дубрав связано с выращиванием здорового посадочного материала в питомниках региона. Статья посвящена изучению эффективности применения фунгицида «Азорро, КС» при выращивании сеянцев дуба черешчатого в условиях открытого и закрытого грунта. Исследования проводились на опытном участке факультета лесного хозяйства и экологии Казанского государственного аграрного университета. В ходе исследований проведен фитопатологический анализ желудей, определена степень заражения вредителями и болезнями, сохранность к концу вегетационного периода; измерены биометрические показатели сеянцев дуба черешчатого. Обнаружены следующие виды грибов — *Penicillium*, *Mucor* и *Rhizopus*. Отмечено положительное влияние применяемого препарата на рост и развитие сеянцев в открытом и закрытом грунте. Наибольшая высота сеянцев дуба черешчатого была отмечена в закрытом грунте с использованием фунгицида — 21,0 см, в открытом грунте средняя высота — 11,0 см. Препарат показал наиболее высокую эффективность в закрытом грунте — 92 %. Получена высокая эффективность в открытом грунте после третьей обработки составила 90 %. Сохранность сеянцев дуба черешчатого к концу вегетационного периода в условиях закрытого грунта варьировала в пределах от 96,9 до 97,1 %.

**Ключевые слова:** дуб черешчатый, фунгицид, фитопатологический анализ, открытый грунт, закрытый грунт

**Ссылка для цитирования:** Тазиев И.Р., Мухаметшина А.Р., Петрова Г.А., Тазмеев Н.М. Эффективность применения фунгицида «Азорро, КС» при выращивании сеянцев дуба черешчатого в условиях открытого и закрытого грунта // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 1. С. 53–59.

DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-53-59

Дуб черешчатый — одна из главнейших лесобразующих пород Республики Татарстан. Дубовые леса республики образуют крупные массивы и являются наиболее ценными. В последнее время вследствие таких неблагоприятных факторов, как сильные морозы, засухи, распространение листогрызущих вредителей и вспышки болезней происходит деградация дубрав [1]. Дуб черешчатый повсеместно поражается мучнистой росой (*Erysiphe alphitoides* L.). Проблема усыхания особей дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) в ареалах его произрастания и при последующей трансформации дубовых древостоев в смешанные лиственные древостои без участия в их составе дуба давно и широко обсуждается в научных и производственных кругах данного направления в разных странах мира [2–8]. Некоторые исследователи отмечают несовершенство форм ведения хозяйства в дубравах как одну из причин деградации. Ученые

подчеркивают актуальность сохранения и восстановления дубрав, повышения их продуктивности, а также необходимость изучения устойчивости и улучшения качественного состояния [9, 10]. Леса региона имеют высокое экологическое и сырьевое значение и как возобновляемые ресурсы требуют своевременного и эффективного воспроизводства с экологической и экономической точек зрения [11–13].

Посадочный материал дуба черешчатого выращивается в лесных питомниках в условиях открытого и закрытого грунта. Борьба с мучнистой росой ведется здесь путем применения различных фунгицидов биологического и химического происхождения в соответствии с интегрированной системой выращивания и защиты сеянцев в лесных питомниках Республики Татарстан [14, 15].

### Цель работы

Цель работы — выявление эффективности фунгицида «Азорро, КС» против мучнистой росы в условиях закрытого и открытого грунта.

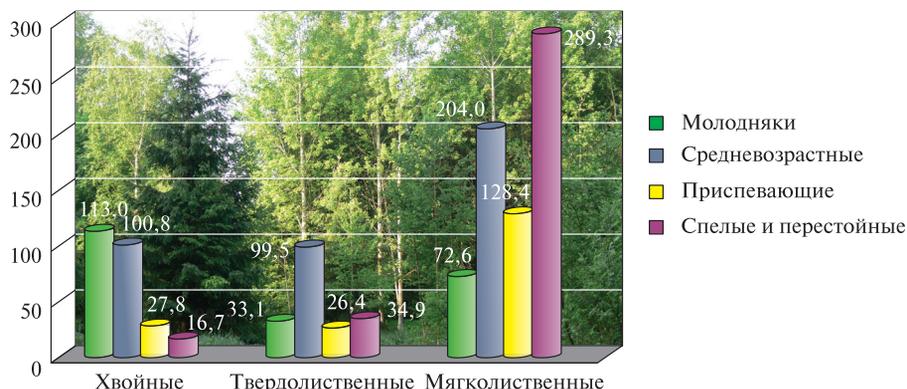


Рис. 1. Структура площадей лесных насаждений по группам древесных пород и группам возраста, тыс. га

Fig. 1. Structure of forest plantations by groups of tree species and age groups, thousand ha

### Объекты и методика исследований

Исследования проводились на опытном участке факультета лесного хозяйства и экологии Казанского государственного аграрного университета. Объект исследования — сеянцы дуба черешчатого. Для выполнения исследований был заложен двухфакторный полевой опыт: 1-й фактор условия выращивания — открытый и закрытый грунт; 2-й фактор — фунгицид «Азорро, КС». Препарат «Азорро, КС» содержит азоксистробин (100 г/дм<sup>3</sup>) и карбендазим (300 г/дм<sup>3</sup>) оказывает стимулирующий эффект на рост и развитие растений, усиливает процесс фотосинтеза. Для посева были собраны желуди с участков государственного лесного фонда ГКУ «Кзыл-Юлдузское лесничество», ГКУ «Тетюшское лесничество» и лесопарковой зоны г. Казани. Фитопатологический анализ желудей проводился согласно «ГОСТ 13056.5–76. Семена деревьев и кустарников. Методы фитопатологического анализа» [16]. Перед посевом желуди предварительно обрабатывали фунгицидом «Азорро, КС». Посев желудей выполняли ручным способом, осенью на 1 пог. м посевной строчки было высеяно 125 г желудей. В течение вегетационного периода проводили трехкратное опрыскивание посевов с интервалом 14 сут, в закрытом и открытом грунте с помощью ручного опрыскивателя. В ходе исследований определили и измерили следующие показатели: грунтовую всхожесть, высоту сеянцев, диаметр корневой шейки, длину корней, массу верхней и нижней части. Биологическую активность фунгицида рассчитывали по модифицированной формуле Аббота [17].

### Результаты исследований

Дуб черешчатый (*Quercus robur* L.) занимает особое место среди лесобразующих пород, является одной из наиболее важнейших пород, естественно произрастающих в Республике Татарстан. Твердолиственные насаждения в Республике

Татарстан занимают площадь 193,0 тыс. га (рис. 1) и представлены в основном насаждениями дуба, на которые приходится 16,7% относительно лесопокрытой площади. Площадь дубовых насаждений с каждым годом сокращается в связи с повреждениями вследствие морозов 1978–1979 гг., поэтому с гибелью дуба увеличиваются площади осиновых, липовых и березовых насаждений. Анализ данных лесного фонда за XX в. показывает, что в Среднем Поволжье около 85 % площади занимают дубравы высокой (I и II классы бонитета) и средней (III класс бонитета) производительности [10, 18].

Лесовозобновление в республике происходит главным образом за счет твердолиственных пород — 55,3 % от общей площади лесных насаждений, большую часть, которых занимает клен — 38,8 %. На долю мягколиственных пород приходится 37,2 %. Наибольшую часть площади занимают липа и осина [10, 18, 19], площадь хвойных составляет всего лишь 7,1 % с наибольшим сосредоточением на северо-западе республики. Прочие древесные породы занимают 0,4 % площади и представлены в большинстве случаев ивой кустарниковой (рис. 2).

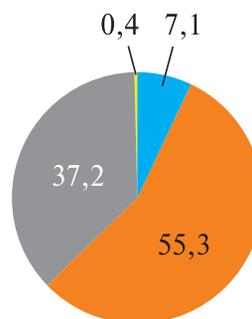


Рис. 2. Распределение площади лесных земель с лесовозобновлением по породам, %: 55,3 — твердолиственные; 37,2 — мягколиственные; 7,1 — хвойные; 0,4 — прочие

Fig. 2. Distribution of the forest land area with reforestation by species, %: 55,3 — hardwood; 37,2 — soft-leaved; 7,1 — coniferous; 0,4 — others

Более всего на ослабление и усыхание дуба влияют грибные заболевания. Прогрессируя на деревьях, источник болезни снижает продуктивность насаждений, что негативно отражается на качестве древостоя, приводит к потере многих полезных функций дубрав. Болезни дуба оказывают отрицательное влияние на выращивание сеянцев и саженцев в питомниках. Это может привести к полной гибели посадочного материала. К основным болезням сеянцев относят пятнистость листьев, мучнистую росу дуба, антракноз, септориоз и т. д. Мучнистая роса приводит к поражению деревьев любого возраста. Белый налет, который формируют грибы, поражает листья дуба и сильно замедляет процессы фотосинтеза, тем самым снижая выход стандартного посадочного материала дуба черешчатого [20].

Достичь успеха в подавлении распространения возбудителей заболеваний возможно посредством проведения защитных мероприятий. В частности, в защите и профилактике против мучнистой росы наиболее эффективными являются химический и биологический методы, применяемые в целях снижения грибного поражения. Химический метод высоко эффективен именно в лесных питомниках и культурах (особенно в возрасте до смыкания крон растений), достаточно легок в использовании — препаратами наполняют ранцевые, ручные и моторизированные опрыскиватели. Фунгициды — химические средства защиты растений от болезней по объему производства, потреблению и ассортименту занимают третье место среди номенклатуры пестицидов. В России

Т а б л и ц а 1

**Фитопатологическая экспертиза желудей дуба черешчатого по участкам**  
Phytopathological examination of common oak acorns by area

Показатель	Номер участка	
	1	2
Доброкачественность, %	52,6	79,0
Чистота, %	93,8	97,2
Класс качества	III	II
Доля плодов, поврежденных вредителями, %	5,9	2
Степень зараженности желудей фитопатогенными грибами	Сильная	Средняя

и за рубежом ведутся исследования по отбору и дальнейшей разработке новых фунгицидов, поэтому ассортимент их постоянно растет [21–25]. Наиболее применимыми являются «Акробат МЦ», «Амистар экстра», «Бордоская жидкость», «Витарос», «Превикур», «Азорро, КС».

Результаты фитопатологического анализа составляют важную часть качественной характеристики семян. При определении класса качества семян учитывается их состояние на момент испытания. Фитопатологическая экспертиза семян позволяет заглянуть в их будущее [14].

По результатам фитопатологической экспертизы, желуди на участке № 1 отнесены к III классу качества (табл. 1). Доброкачественность плодов составила 52,6 %, чистота — 93,8 %. Часть исследованных плодов были повреждены желудевым

Т а б л и ц а 2

**Биометрические показатели сеянцев дуба черешчатого в открытом и закрытом грунте**  
Biometric indicators of common oak seedlings in open and protected ground

Показатели	Вариант опыта	Условия выращивания		
		Закрытый грунт	Открытый грунт	НСР <sub>05</sub> для главных эффектов
Высота сеянцев, см	Контроль	18,0	8,0	А 4,97 В 3,21
	«Азорро, КС»	21,0	11,0	
Длина корневой части, см	Контроль	19,0	11,0	А 3,97 В 2,21
	«Азорро, КС»	18,0	15,0	
Диаметр корневой шейки, мм	Контроль	2,2	2,0	А 3,72 В 3,96
	«Азорро, КС»	2,8	2,0	
Кол-во всходов, шт./п. м	Контроль	65,0	44,0	А 4,97 В 3,21
	«Азорро, КС»	70,0	50,0	
Кол-во сеянцев, шт./п. м	Контроль	63,0	40,0	А 3,97 В 2,21
	«Азорро, КС»	68,0	45,0	
Сохранность, %	Контроль	96,9	90,9	—
	«Азорро, КС»	97,1	90,0	
Масса верхней части растений, г	Контроль	140,0	60,0	А 4,54 В 3,42
	«Азорро, КС»	100,0	80,0	
Масса нижней части растений, г	Контроль	300,0	180,0	А 6,21 В 2,41
	«Азорро, КС»	290,0	150,0	

Таблица 3

**Биологическая эффективность применения фунгицидов в открытом грунте**  
Biological effectiveness of fungicides in the open ground

Показатель	Вариант опыта	
	контрольный (без обработки)	обработка «Азорро, КС»
Развитие мучнистой росы в зависимости от кратности обработки, %	однократно	43,2
	двукратно	—
	трехкратно	—
Эффективность фунгицида в зависимости от кратности обработки, %	однократно	66
	двукратно	84
	трехкратно	90

Таблица 4

**Биологическая эффективность применения фунгицидов в закрытом грунте**  
Biological efficiency of fungicide application in protected ground

Показатель	Вариант опыта	
	контрольный (без обработки)	обработка «Азорро, КС»
Развитие мучнистой росы в зависимости от кратности обработки, %	однократно	17,2
	двукратно	—
	трехкратно	—
Эффективность фунгицида в зависимости от кратности обработки, %	однократно	81
	двукратно	88
	трехкратно	92



**Рис. 3.** Сеянцы дуба черешчатого в закрытом грунте (4 ряда слева — контрольный вариант, ряды справа — сеянцы, обработанные фунгицидом «Азорро, КС»)

**Fig. 3.** Common oak seedlings in protected ground (4 rows on the left — control variant, rows on the right — seedlings treated with the Azorro, KS fungicide)

долгоносиком — 5,9 %. На желудях с различной степенью заражения были обнаружены следующие виды грибов: *Penicillium* (слабое), *Mucor* и *Rhizopus* (сильное). Общая степень зараженности грибами на участке № 1 оценивается как сильная.

Желуди, отобранные в условиях городской среды г. Казани, были отнесены к II классу качества. Доброкачественность и чистота плодов выше, чем на участке № 1 — 79 и 97,2 % соответственно. Намного ниже доля поврежденных вредителями желудей — 2 %. По результатам фитопатологического анализа, желуди, собранные на участке № 2, показали среднюю степень зараженности. На плодах были обнаружены те же виды грибов, что и на участке № 1 — *Penicillium* (слабая зараженность), *Mucor* и *Rhizopus* (средняя зараженность). На плодах, собранных на двух участках, присутствуют сапрофитные грибы.

Первичное заражение желудей грибами происходит во время их роста, но дальнейшее интенсивное развитие болезни может происходить в случае неправильного хранения и транспортировки. Сравнивая полученные данные, можно сделать вывод, что основную роль в развитии болезни сыграло наличие и характер лесной подстилки. На участке № 1 — в лесу — она рыхлая, местами достигает 10 см, что более благоприятно для развития фитопатогенных грибов. Городская среда подвержена влиянию антропогенного фактора, в частности, в виде вытоптанности участка и местами отсутствием лесной подстилки, влияющего на интенсивность развития вредителей и грибов.

Как видно из табл. 2, фунгицид оказал положительное влияние на рост сеянцев в открытом и закрытом грунте. Сравнительный анализ результатов исследований показал, что наибольшая высота сеянцев дуба черешчатого была достигнута в закрытом грунте с использованием фунгицида — 21,0 см, что превышает показатели контрольного варианта на 16,8 %. Аналогичная тенденция наблюдается в открытом грунте — средняя высота составила 11,0 см, также превысившая показатели контрольного варианта на 37 %.

Сохранность сеянцев дуба черешчатого к концу вегетационного периода также была значительной. В условиях закрытого грунта сохранность сеянцев варьировала в пределах от 96,9 до 97,1 %. Вследствие отличий условий роста растений в открытом грунте сохранность сеянцев снизилась до 90,0 % (см. табл. 2).

Проведенный в сентябре 2021 г. учет показал, что препарат «Азорро, КС» имеет высокую эффективность в отношении мучнистой росы как в закрытом, так и в открытом грунте.

В результате исследований было установлено, что препарат имеет наиболее высокую эффективность в закрытом грунте — 92 % (рис. 3). Эффективность в открытом грунте после третьей обработки составила 90 % (табл. 3). Снижение эффективности фунгицида в открытом грунте относительно закрытого обусловлено избытком атмосферных осадков (табл. 4). При каждой повторной обработке ситуация улучшалась. Развитие мучнистой росы на открытом грунте в обрабатываемом участке снизилось до 4,3 %, на контрольном участке составило 43,2 %. В закрытом грунте развитие мучнистой росы снизилось до 1,4 %, в контрольном варианте — 17,2 %.

## Выводы

Фунгицид «Азорро, КС» имеет высокую эффективность в борьбе с мучнистой росой в посевах дуба в закрытом и открытом грунте. Обработку дуба фунгицидом целесообразно проводить при первых признаках проявления болезни. Наибольшая эффективность препарата достигается при трехкратном опрыскивании в течение вегетационного периода.

## Список литературы

- [1] Стороженко В.Г., Коткова В.М., Чеботарев П.А. Динамика трансформации коренных дубрав и дереворазрушающие базидиальные грибы Теллермановского леса // Вестник МГУЛ – Лесной вестник, 2014. № 4 (104). С. 77–84.
- [2] Бугаев В.А., Мусиевский А.Л., Царалунга В.В. Дубравы европейской части России // ИзВУЗ Лесной журнал, 2004. № 2. С. 7–13.
- [3] Калининченко Н.П. Дубравы России. М.: Изд-во ВНИИ-Цлесресурс, 2000. 536 с.
- [4] Стороженко В.Г., Чеботарева В.В., Чеботарев П.А. Состояние древесных пород и воспроизводство дубовых древостоев в зоне лесостепи // Лесохозяйственная информация, 2018. № 3. С. 51–62.
- [5] Михина В.В., Харченко Н.Н. Особенности роста дуба черешчатого в искусственных линейных насаждениях центральной лесостепи // Современные проблемы экологии животного и растительного мира. Материалы Всерос. молодежной науч.-практ. конф. / под ред. Ю.В. Чекменевой. Воронеж, 19 апреля 2021 г. Воронеж: Изд-во ВГЛТУ, 2021. С. 42–45.
- [6] Царалунга В.В. Трагедия российских дубрав // ИзВУЗ Лесной журнал, 2005. № 6. С. 23–30.
- [7] Царалунга В.В., Царалунга А.В., Короткая А.В. Встречаемость признаков патологии на дубе черешчатом // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2019. Т. 7. № 3 (46). С. 314–319.
- [8] Чеботарев П.А., Чеботарева В.В. Формирование искусственных дубовых древостоев в регионах лесостепной зоны Европейской части России // Флора и растительность Центрального Черноземья — 2014: Межрегион. науч. конф., Курск, 05 апреля 2014 г. Курск: [б. и.], 2014. С. 174–179.
- [9] Глушко С.Г., Манюкова И.Г., Прохоренко Н.Б. Восстановление дубрав Среднего Поволжья // Вестник ОмГАУ, 2017. № 3 (27). С. 56–61.
- [10] Пуряев А.С., Зарипов И.Н., Петров В.А. Дубравы Среднего Поволжья: состояние, воспроизводство и сохранение // Лесохозяйственная информация, 2019. № 3. С. 190–198. DOI 10.24419/LNI.2304-3083.2019.3.16
- [11] Демаков Ю.П., Пуряев А.С., Мифтахов Т.Ф. Динамика производительности древостоев в Предкамье Республики Татарстан // Лес, лесной сектор и экология. Казань: Изд-во КГАУ, 2015. С. 38–44.
- [12] Пуряев А.С., Демаков Ю.П. Структура лесов Предкамья Республики Татарстан // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета, 2014. № 104. С. 829–841.
- [13] Романов Е.М., Нуреева Т.В., Мифтахов Т.Ф., Пуряев А.С. Экологическая и сырьевая роль лесов Республики Татарстан // Вестник ПГТУ. Сер. Лес. Экология. Природопользование, 2015. № 2 (26). С. 5.
- [14] Ведерников Н.М., Калегин А.А., Федорова Н.С. Рекомендации по интегрированной системе выращивания и защиты от болезней сеянцев дуба черешчатого в питомниках. Чебоксары: [б. и.], 2000. 23 с.
- [15] Ведерников Н.М., Калегин А.А., Тарапыгин В.Н. Об усовершенствовании орудий и механизмов в питомниках // Лесное хозяйство, 1997. № 1. С. 49–50.
- [16] ГОСТ 13056.5–76. Семена деревьев и кустарников. Методы фитопатологического анализа. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200025566> (дата обращения 15.02.2022).
- [17] Методические указания по регистрационным испытаниям фунгицидов в сельском хозяйстве / под ред. С.Ф. Буга. Несвиж: Несвижская укр. тип. им. С. Будного, 2007. 512 с.
- [18] Государственный доклад «О состоянии природных ресурсов и об охране окружающей среды Республики Татарстан в 2020 году». URL: <https://eco.tatarstan.ru/gosdoklad-2020.htm> (дата обращения 15.02.2022).
- [19] Petrova G.A., Yatmanova N.M., Mukhametshina A.R., Musin H.G., Akhmetov A.Y. Microclonal reproduction of common aspen (*Populus tremula* L.) genotypes in the Republic of Tatarstan // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science «International AgroScience Conference, AgroScience 2021», Cheboksary, 16.04.2021. Cheboksary: IOP Publishing Ltd, 2021, p. 012003. DOI 10.1088/1755-1315/935/1/012003
- [20] Чураков Б.П., Чураков Д.Б. Лесная фитопатология. СПб.: Лань, 2012. 448 с.
- [21] Мухаметшина А.Р., Петрова Г.А., Мусин Х.Г. Сравнительная характеристика и эффективность применения новых препаратов при выращивании посадочного материала лиственницы сибирской (*Larix sibirica*) в питомнике учебно-опытного Пригородного лесхоза Республики Татарстан // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2020. № 231. С. 29–40. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.231.29-40
- [22] Мухаметшина А.Р., Петрова Г.А., Мусин Х.Г., Гибадуллин Н.Ф., Фетисова А.А. Результаты применения различных препаратов при выращивании посадочного материала лиственницы сибирской в условиях Предкамья Республики Татарстан // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства, 2020. № 4. С. 36–53.
- [23] Тропин И.В., Ведерников Н.М., Крангауз Р.А. Справочник по защите леса от вредителей и болезней. М.: Лесная пром-сть, 1980. 376 с.
- [24] Mukhametshina A.R., Gafiyatov R., Pukhacheva L.Yu. The results of pre-sowing conifer seeds treatment by growth stimulators // BIO Web of Conferences: International Scientific-Practical Conference «Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources» (FIES 2019), Kazan, 13–14 ноября 2019 года. Kazan: EDP Sciences, 2020, p. 00130. DOI 10.1051/bioconf/20201700130
- [25] Яковлев А.С., Яковлев И.А. Дубравы Среднего Поволжья. Йошкар-Ола: Изд-во Марийского ГТУ, 1999. 351 с.

## Сведения об авторах

**Тазиев Инсаф Рамилевич** — аспирант кафедры лесоводства и лесных культур факультета лесного хозяйства и экологии, ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет», insaftaziev@gmail.com

**Мухаметшина Айгуль Рамилевна** <sup>✉</sup> — канд. с.-х. наук, доцент кафедры лесоводства и лесных культур факультета лесного хозяйства и экологии, ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет», aigulsafina@yandex.ru

**Петрова Гузель Анисовна** — канд. с.-х. наук, доцент кафедры лесоводства и лесных культур факультета лесного хозяйства и экологии, ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет», guzel-petrva@rambler.ru

**Тазмеев Нияз Маратович** — руководитель-лесничий ГКУ «Кзыл-Юлдузское лесничество»

Поступила в редакцию 17.03.2022.

Одобрено после рецензирования 05.07.2022.

Принята к публикации 16.11.2022.

## APPLICATION EFFICIENCY OF «AZORRO, KS» FUNGICIDE IN GROWING COMMON OAK SEEDLINGS IN OPEN AND PROTECTED GROUND

I.R. Taziev<sup>1</sup>, A.R. Mukhametshina<sup>1✉</sup>, G.A. Petrova<sup>1</sup>, N.M. Tazmееv<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kazan State Agrarian University, 65, K. Marx st., 420015, Kazan, Republic of Tatarstan, Russia

<sup>2</sup>Kyzyl-Yulduz Forestry, Parkovaya st., 422667, p. Kyzyl-Yulduz Forestry, Rybno-Slobodsky district, Republic of Tatarstan, Russia

aigulsafina@yandex.ru

Nowadays the problem of oak forests degradation is topical today in the Republic of Tatarstan, where large woods are formed and are considered to be the most valuable. The area of oak plantations decreases every year due to damage caused by frosts in 1978–1979, therefore, with the oak dying, the areas of aspen, linden and birch plantations increase. The oak forests regeneration is connected with the cultivation of healthy planting material in the nurseries of the region. The article is devoted to the study of the fungicide «Azorro, KS» efficiency in the cultivation of common oak seedlings in open and protected ground conditions. The research was carried out at the experimental site of the Faculty of Forestry and Ecology of the Kazan State Agrarian University. In the course of the research, a phytopathological analysis of acorns was carried out, the degree of infection with pests and diseases, safety by the end of the growing season was determined; biometric indicators of common oak seedlings were measured. The following types of fungi have been found such as *Penicillium*, *Mucor* and *Rhizopus*. The positive effect of the drug used on the growth and development of seedlings in open and protected ground was noted. The highest common oak seedlings were noted in protected ground using a fungicide — 21,0 cm, in open ground the average height was 11,0 cm. The preparation showed its highest efficiency in protected ground — 92 %. High efficiency in the open ground after the third treatment was 90 %. The safety of common oak seedlings by the end of the growing season in protected ground conditions varied from 96,9 to 97,1 %.

**Keywords:** common oak, fungicide, phytopathological analysis, open ground, protected ground

**Suggested citation:** Taziev I.R., Mukhametshina A.R., Petrova G.A., Tazmееv N.M. *Effektivnost' primeneniya fungitsida «Azorro, KS» pri vyrashchivanii seyantsev duba chereshchatogo v usloviyakh otkrytogo i zakrytogo grunta* [Application efficiency of «Azorro, KS» fungicide in growing common oak seedlings in open and protected ground]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 1, pp. 53–59.

DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-53-59

## References

- [1] Storozhenko V.G., Kotkova V.M., Chebotarev P.A. *Dinamika transformatsii korennykh dubrav i derevorazrushayushchie bazidial'nye griby Tellermanovskogo lesa* [Dynamics of transformation of native oak forests and wood-destroying basidiomycetes of the Tellerman Forest]. Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik, 2014, no. 4 (104), pp. 77–84.
- [2] Bugaev V.A., Musievskiy A.L., Tsaralunga V.V. *Dubravы evropeyskoy chasti Rossii* [Oak forests of the European part of Russia]. Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal), 2004, no. 2, pp. 7–13.
- [3] Kalinichenko N.P. *Dubravы Rossii* [Oak forests of Russia]. Moscow: VNIITslesresurs, 2000, 536 p.
- [4] Storozhenko V.G., Chebotareva V.V., Chebotarev P.A. *Sostoyaniye drevesnykh porod i vosproizvodstvo dubovykh drevostoev v zone lesostepi* [The state of tree species and the reproduction of oak stands in the forest-steppe zone]. Lesokhozyaystvennaya informatsiya [Forestry Information], 2018, no. 3, pp. 51–62.
- [5] Mikhina V.V., Kharchenko N.N. *Osobennosti rosta duba chereshchatogo v iskusstvennykh lineynykh nasazhdeniyakh tsentral'noy lesostepi* [Features of the growth of English oak in artificial linear plantations of the central forest-steppe]. *Sovremennyye problemy ekologii zhivotnogo i rastitel'nogo mira. Materialy Vserossiyskoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern problems of ecology of the animal and plant world. Proceedings of the All-Russian Youth Scientific and Practical Conference]. Ed. Yu. V. Chekmeneva, Voronezh, April 19, 2021. Voronezh: VGLTU, 2021, pp. 42–45.
- [6] Tsaralunga V.V. *Tragediya rossiyskikh dubrav* [The tragedy of Russian oak forests]. Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal), 2005, no. 6, pp. 23–30.

- [7] Tsaralunga V.V., Tsaralunga A.V., Korotkaya A.V. *Vstrechaemost' priznakov patologii na dube chereshchatom* [Occurrence of signs of pathology on English oak]. Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika [Actual directions of scientific research of the 21st century: theory and practice], 2019, v. 7, no. 3 (46), pp. 314–319.
- [8] Chebotarev P.A., Chebotareva V.V. *Formirovanie iskusstvennykh dubovykh drevostoev v regionakh lesostepnoy zony Evropeyskoy chasti Rossii* [Formation of artificial oak stands in the regions of the forest-steppe zone of the European part of Russia]. Flora i rastitel'nost' Tsentral'nogo Chernozem'ya — 2014: mezhhregional'naya nauchnaya konferentsiya [Flora and vegetation of the Central Chernozem region — 2014: Interregional scientific conference], Kursk, April 05, 2014. Kursk: [b. i.], 2014, pp. 174–179.
- [9] Glushko S.G., Manyukova I.G., Prokhorenko N.B. *Vosstanovlenie dubrav Srednego Povolzh'ya* [Restoration of oak forests of the Middle Volga]. Vestnik OmGAU [Bulletin of OmGAU], 2017, no. 3 (27), pp. 56–61.
- [10] Puryaev A.S., Zaripov I.N., Petrov V.A. *Dubravyy Srednego Povolzh'ya: sostoyanie, vosproizvodstvo i sokhraneniye* [Oak forests of the Middle Volga region: state, reproduction and conservation]. Lesokhozyaystvennaya informatsiya [Forestry information], 2019, no. 3, pp. 190–198. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2019.3.16
- [11] Demakov Yu.P., Puryaev A.S., Miftakhov T.F. *Dinamika proizvoditel'nosti drevostoev v Predkam'e Respubliki Tatarstan* [Dynamics of productivity of forest stands in the Fore-Kama region of the Republic of Tatarstan]. Les, lesnoy sektor i ekologiya [Forest, forest sector and ecology]. Kazan: KSAU, 2015, pp. 38–44.
- [12] Puryaev A.S., Demakov Yu.P. *Struktura lesov Predkam'ya Respubliki Tatarstan* [Forest structure of the Pre-Kama region of the Republic of Tatarstan]. Politematicheskiy setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University], 2014, no. 104, pp. 829–841.
- [13] Romanov E.M., Nureeva T.V., Miftakhov T.F., Puryaev A.S. *Ekologicheskaya i syr'evaya rol' lesov Respubliki Tatarstan* [Ecological and resource role of the forests of the Republic of Tatarstan]. Vestnik PGU. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie [Bulletin of PSTU. Series: Forest. Ecology. Nature management], 2015, no. 2 (26), p. 5.
- [14] Vedernikov N.M., Kalegin A.A., Fedorova N.S. *Rekomendatsii po integrirovannoy sisteme vyrashchivaniya i zashchity ot bolezney seyantsev duba chereshchatogo v pitomnikakh* [Recommendations for an integrated system for the cultivation and protection against diseases of English oak seedlings in nurseries]. Cheboksary: [b. i.], 2000, 23 p.
- [15] Vedernikov N.M., Kalegin A.A., Tarapygin V.N. *Ob usovershenstvovaniy orudiy i mekhanizmov v pitomnikakh* [On the improvement of tools and mechanisms in nurseries]. Lesnoe khozyaystvo [Forestry], 1997, no. 1, pp. 49–50.
- [16] GOST 13056.5–76 *Semena derev'ev i kustarnikov. Metody fitopatologicheskogo analiza* [Seeds of trees and shrubs. Methods of phytopathological analysis]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200025566> (accessed 15.02.2022).
- [17] *Metodicheskie ukazaniya po registratsionnym ispytaniyam fungitsidov v sel'skom khozyaystve* [Guidelines for registration testing of fungicides in agriculture]. Ed. S.F. Bug. Nesvizh: Nesvizhskaya ukr. tip. im. S. Budnogo, 2007, 512 p.
- [18] *Gosudarstvennyy doklad «O sostoyanii prirodnnykh resursov i ob okhrane okruzhayushchey sredy Respubliki Tatarstan v 2020 godu»* [State report «On the state of natural resources and environmental protection of the Republic of Tatarstan in 2020»]. Available at: <https://eco.tatarstan.ru/gosdoklad-2020.htm> (accessed 15.02.2022).
- [19] Petrova G.A., Yatmanova N.M., Mukhametshina A.R., Musin H.G., Akhmetov A.Y. Microclonal reproduction of common aspen (*Populus tremula* L.) genotypes in the Republic of Tatarstan. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science «International AgroScience Conference, AgroScience 2021», Cheboksary, 16.04.2021. Cheboksary: IOP Publishing Ltd, 2021, p. 012003. DOI 10.1088/1755-1315/935/1/012003
- [20] Churakov B.P., Churakov D.B. *Lesnaya fitopatologiya* [Forest phytopathology]. St. Petersburg: Lan', 2012, 448 p.
- [21] Mukhametshina A.R., Petrova G.A., Musin Kh.G. *Sravnitel'naya kharakteristika i effektivnost' primeneniya novykh preparatov pri vyrashchivaniy posadochnogo materiala listvennitsy sibirskoy (Larix sibirica) v pitomnike uchebno-opytного Prigorodnogo leskhozho Respubliki Tatarstan* [Comparative characteristics and effectiveness of the use of new drugs in the cultivation of planting material of Siberian larch (*Larix sibirica*) in the nursery of the experimental Prigorodny forestry enterprise of the Republic of Tatarstan]. Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii [News of the St. Petersburg Forestry Academy], 2020, no. 231, pp. 29–40. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.231.29-40
- [22] Mukhametshina A.R., Petrova G.A., Musin Kh.G., Gibadullin N.F., Fetisova A.A. *Rezultaty primeneniya razlichnykh preparatov pri vyrashchivaniy posadochnogo materiala listvennitsy sibirskoy v usloviyakh Predkam'ya Respubliki Tatarstan* [The results of the use of various preparations in the cultivation of planting material of Siberian larch in the conditions of the Cis-Kama region of the Republic of Tatarstan]. Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva [Proceedings of the St. Petersburg Research Institute of Forestry], 2020, no. 4, pp. 36–53.
- [23] Tropin I.V., Vedernikov N.M., Krangauz R.A. *Spravochnik po zashchite lesa ot vrediteley i bolezney* [Handbook on the protection of forests from pests and diseases]. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1980, 376 p.
- [24] Mukhametshina A.R., Gafiyatov R., Pukhacheva L. Yu. The results of pre-sowing conifer seeds treatment by growth stimulators. BIO Web of Conferences: International Scientific-Practical Conference «Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources» (FIES 2019), Kazan, 13–14 November 2019. Kazan: EDP Sciences, 2020, p. 00130. DOI 10.1051/bioconf/20201700130
- [25] Yakovlev A.S., Yakovlev I.A. *Dubravyy Srednego Povolzh'ya* [Oak forests of the Middle Volga region]. Yoshkar-Ola: Mari State Technical University, 1999, 351 p.

## Authors' information

**Taziev Insaf Ramilevich** — pg. of the Department of Forestry and Forest Crops Faculty of Forestry and Ecology, «Kazan State Agrarian University», [insaftaziev@gmail.com](mailto:insaftaziev@gmail.com)

**Mukhametshina Aygul' Ramilevna** — Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor of the Department of Forestry and Forest Crops Faculty of Forestry and Ecology, «Kazan State Agrarian University», [augulsafina@yandex.ru](mailto:augulsafina@yandex.ru)

**Petrova Guzel' Anisovna** — Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor of the Department of Forestry and Forest Crops Faculty of Forestry and Ecology, «Kazan State Agrarian University», [guzel-petrva@rambler.ru](mailto:guzel-petrva@rambler.ru)

**Tazmeev Niyaz Maratovich** — Head-forester of Kyzyl-Yulduz Forestry, [Kzyl-yulduzkoe.Gku@tatar.ru](mailto:Kzyl-yulduzkoe.Gku@tatar.ru)

Received 17.03.2022.

Approved after review 05.07.2022.

Accepted for publication 16.11.2022.

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

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОРОДЫ ДЕРЕВЬЕВ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Д.Ю. Войтов<sup>1</sup>✉, С.Б. Васильев<sup>2</sup>, Д.В. Кормилицын<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «Инжиниринговый центр «Автоматика и робототехника МГТУ им. Н.Э. Баумана», 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

<sup>2</sup>Мытищинский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», 141005, Россия, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

leonickss@yandex.ru

Представлена разработанная технология определения на фотографии породы деревьев березы повислой (*Betula pendula* Roth), а также материалы изучения различных известных нейронных сетей классификаторов с определением объектов. Среди них выбрана нейронная сеть-классификатор YOLOv4, как самая перспективная для дальнейшего развития технологии. Изучен механизм разметки фотоизображений для формирования примеров обучения. Сформированы методика разметки на изображениях, два различных датасета для дообучения сети. Проведено алгоритмическое увеличение датасета путем трансформации фотоизображений и наложения фильтров. Определено различие в работе классификатора. Точность определения породы при обучении исключительно на фотоизображениях, содержащих березу повислую, составила 35 %, при обучении на датасете, содержащем другие деревья, — 71 %, на всем датасете — 75 %. Для демонстрации работы были определены деревья березы на фотографиях, выполненных в дендропарке Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Для усовершенствования технологии рекомендуется дообучение сети для определения остальных пород деревьев. Технологию можно использовать для осуществления таксации конкретных пород деревьев, формирования размеченных датасетов для дальнейших разработок, как первичный элемент в системе анализа изображений деревьев, для исключения сторонних объектов на исходном фотоизображении.

**Ключевые слова:** компьютерное зрение, береза повислая, таксация, YOLO, нейронные сети

**Ссылка для цитирования:** Войтов Д.Ю., Васильев С.Б., Кормилицын Д.В. Разработка технологии определения породы деревьев с применением компьютерного зрения // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 1. С. 60–66. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-60-66

В современном высокотехнологичном мире все чаще возникает вопрос о замене различными алгоритмами человеческого труда. Лесная отрасль не является исключением. Нахождение и обнаружение объектов представляет собой бессознательное свойство человеческого глаза, что позволяет решать широкий спектр задач. Развитие современных технологий дает возможность подменить человека машиной. Область знаний, отвечающая за распознавание объектов на фотоизображениях, называется компьютерным зрением.

### Цель работы

Цель работы — рассмотрение технологии определения объектов на фотоизображении.

### Материалы и методы

Определяемым объектом принят самый распространенный вид дерева — береза повислая (*Betula pendula* Roth). Основная задача исследования — формирование метода определения участков фотоизображения, содержащих *Betula pendula* Roth, выявление механизмов оценки эффективности разработанной технологии, изучение перспектив-

ности и программная реализация. Данную задачу можно отнести к типовым, решаемым с помощью технологии компьютерного зрения.

Обработка фотоизображений для компьютера нетривиальная задача [1]. У объектов на фотоизображении часто не видно четких границ, одни объекты могут перекрывать другие и довольно сильно отличаются один от другого. Таким образом, использовать стандартные алгоритмы и решения для определения границ объектов и их типов не всегда приемлемо. Для решения возникшей проблемы разработаны и широко применяются технологии компьютерного зрения.

Одним из самых распространенных инструментов в компьютерном зрении являются нейросетевые технологии [2]. Их суть заключается в формировании определенной сетевой структуры, к частным элементам которой относится упрощенная модель нейронов [3], при прохождении информации по которой формируется решение задачи.

Нейронные сети определения конкретных объектов называются определителем объектов (object detector) [4] и представляют собой довольно сложные для понимания структуры, состоящие из десятков миллионов нейронов. Нейронные сети предварительно обучаются на больших выборках

различных данных, включающих в себя сотни тысяч размеченных фотоизображений. Тем не менее, для специализации нейронных сетей необходимы существенно меньшие объемы данных, что позволяет подстраивать этот инструмент под себя.

По методике обработки фотоизображений нейронные сети можно условно подразделить на два типа: одно- и двухэтапные [5].

Двухэтапные сети предварительно разбивают изображения на регионы, в которых отмечаются области, с наибольшей вероятностью содержащие объекты. После чего такие области подвергаются дополнительному рассмотрению с помощью основного классификатора, который более точно определяет границы объектов и их относимость к какому-либо классу.

Одноэтапные сети генерируют некоторое количество рамок на исходном фотоизображении, после чего доопределяют их расположение и границы. Этот метод позволяет существенно ускорить процесс определения объекта [5].

Для определения точности обычно используется метрика отношения площадей окружающих рамок [6]. Ее суть заключается в соотношении пересекающихся областей предполагаемых алгоритмом границ вокруг объекта и предварительно размеченной истинной рамкой, соответствующей ему. Таким образом, результат считается тем лучше, чем он ближе к единице.

Для задач с большим количеством различных категорий определяемых объектов применяется также метрика усредненной по всем классам точности [7]. Это позволяет получать менее узконаправленные классификаторы. В настоящей работе такая метрика не рассматривается, однако она может быть важной при дальнейшем развитии технологии.

Третьей метрикой [4] оценки систем называют сложность обработки фотоизображения и разметки на нем всех объектов. Несмотря на то, что ее влияние считается незначительным в решении задач определения объектов на фотографиях, низкая скорость выполнения алгоритмов и высокая ресурсоемкость удлиняют время обработки изображений.

Таким образом, нельзя склоняться к исключительно точным алгоритмам, поскольку это может привести к значительным ограничениям в масштабировании и дальнейшем развитии технологии.

## Результаты и обсуждение

Среди огромного разнообразия различных определителей можно выделить несколько по-настоящему используемых и популярных, которые опережают остальные по всем параметрам и конкурируют лишь между собой. К ним относятся: RCNN, RFCN, SSD, YOLOv4 [8].

Первые две относятся к двухэтапным сетям, последующие — к одноэтапным.

RCNN (Region — Based Convolutional Neural Network) [8] — прямой представитель двухэтапной сети. Суть алгоритма определения фотоизображений состоит в определении зон интереса и последующей классификации объектов в них. Алгоритм показывает точность классификации около 70,4 %, а время обработки фотоизображений составило в среднем более 200 мс [9, 10].

RFCN (Region — Based Fully-Convolutional Network) [11] — собой ускоренный вариант RCNN. Одновременно выполняет работу по классификации и построению зон интереса. Полученные результаты совмещаются для корректировки итоговых границ объектов. Имеет точность до 80,5 %, при времени обработки около 85 мс [9, 10].

SSD (Single — Shot Detector) и YOLOv4 (You Only Look Once) [12, 13] отличаются исключительно по структуре нейронной сети, сохраняя единый подход. SSD показывает точность около 75,8 % с временем обработки 61 мс, а YOLOv4 — 79,6 % и 29 мс соответственно [9, 10].

На основании представленных характеристик было принято решение о использовании нейронной сети YOLOv4, поскольку при незначительно меньшем по сравнению с RFCN качестве определения (около 1 %), время обработки фотоизображения уменьшилось практически в 3 раза, т. е. YOLOv4 можно использовать для систем реального времени (рис. 1) [14].

Для дообучения нейронной сети YOLOv4 было собрано несколько сотен различных фотоизображений, содержащих березу повислую (*Betula pendula* Roth). Поскольку задача заключалась в определении березы на фотоизображениях, возник вопрос о его разметке: почти на половине фотоизображений дерево не было представлено в полную величину, вследствие чего YOLOv4 могла неправильно распознать дерево или не найти его на фотоизображении. Для того, чтобы решить проблему кроны и ствол дерева разделили на два типа: кроны выделили в класс «кроны» (1-й), а стволы — в класс «березы» (2-й). Затем был написан скрипт на языке python, который перед формированием итогового изображения с разметкой находил пересекающиеся ограничительные рамки обоих классов и объединял их [15]. Остальные объекты класса «крона» удалялись. Кроме этого, данное решение позволяло получить несколько составных элементов дерева, что стало полезно для изучения. После принятия решения о способе разметки в ручном режиме с использованием специального программного обеспечения (ПО) Label.Image [16] были определены кроны и стволы. Важно отметить, что отмечались кроны, принадлежащие и к другим породам деревьев.

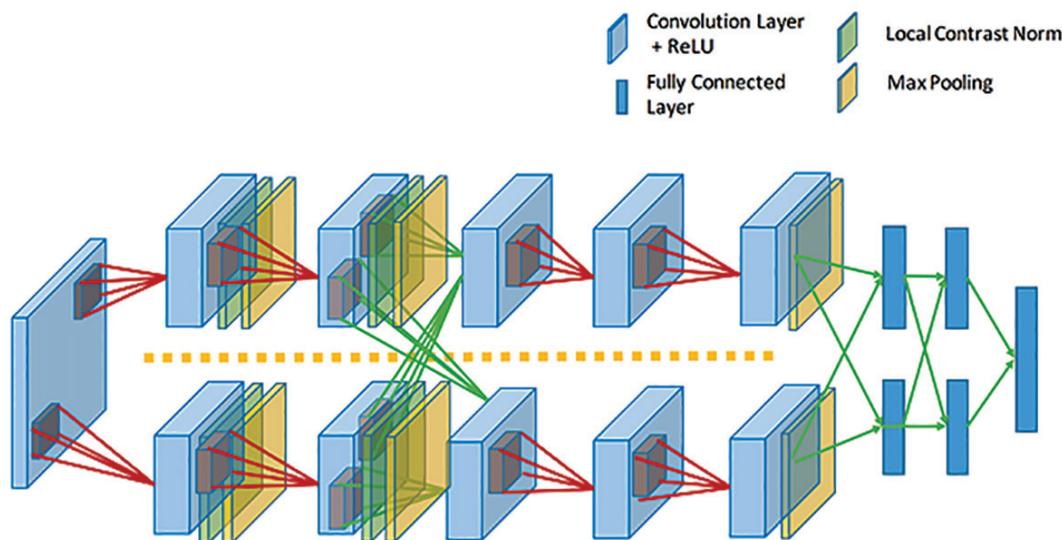


Рис. 1. Структура нейронной сети YOLOv4 [14]  
 Fig. 1. The structure of the YOLOv4 neural network [14]

Сама разметка представляла собой выделение мышью прямоугольника на изображении, содержащем необходимые объекты, после чего им присваивался соответствующий класс (1-й или 2-й). После этого программа Label.Image самостоятельно создает дополнительную папку, в которой хранятся текстовые файлы [16], соответствующие изображениям. Структура файла [17, 18] представляет собой пять чисел, написанных через запятую, для каждого из отмеченных на фотографии объектов: первое число — номер класса объекта; второе и третье — координаты  $X$  и  $Y$  левой нижней точки выделенного на изображении прямоугольника в виде нормализованного значения (отношение номера пикселя к общему количеству пикселей); четвертое и пятое — координаты правой верхней точки. Это позволяет осуществить разметку в автоматическом режиме при программном известном изменении исходных фотоизображений.

Количество изображений искусственно увеличили в 2 раза путем добавления различных шумовых фильтров и небольших случайных поворотов исходных изображений [19, 20]. После этого были созданы файлы с разметкой, в которых проведено программное вычисление новых границ разметки. В отношении некоторых из случайно сгенерированных фотографий выполнили дополнительную проверку во избежание ошибок и в целях достижения точности полученного алгоритма. Для изучения влияния датасета подобранные изображения условно разделили на две группы: изображения, содержащие исключительно березу повислую (*Betula pendula* Roth) в единственном экземпляре, и изображения, на которых находились и другие породы деревьев.

В каждой из групп выделили тренировочное и тестовое подмножества, поскольку выделение валидационного подмножества было определено как нецелесообразное в связи с недостаточным количеством изображений и отсутствия необходимости доработки архитектуры сети [21].

Таким образом, на тренировочную выборку было выделено 70 % всех изображений, а на тестовую — 30 %. Распределение проводилось программно, случайным образом. После этого программно было проведено масштабирование всех фотоизображений до единого размера 640×640 пикселей [22].

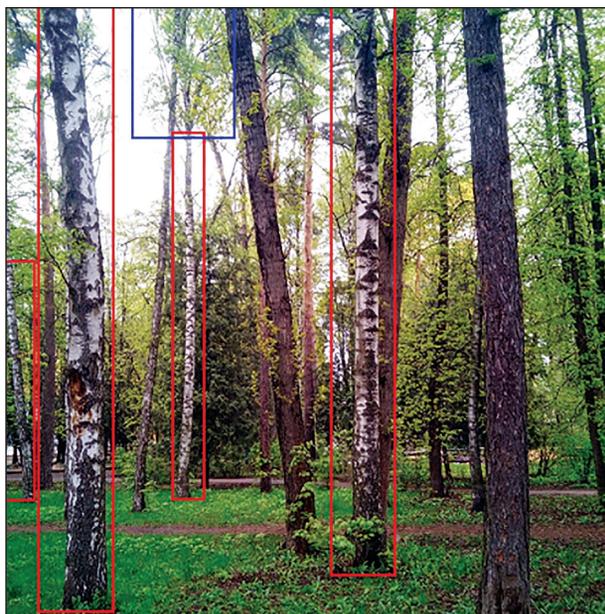
**Результаты точности определения березы повислой (*Betula pendula* Roth) на тестовом датасете в зависимости от обучающей выборки**

The results of the accuracy of determining *Betula pendula* Roth on the test dataset, depending on training sample

Содержание датасета	Точность определения, %
Исключительно береза повислая ( <i>Betula pendula</i> Roth)	35
Множественные породы деревьев	71
Совмещенный	75

В каждую эпоху обучения велось сохранение весов в сети для возможности выбора оптимальной с точки зрения точности на тестовом подмножестве (таблица).

При обучении на фотографиях, содержащих исключительно березу повислую, точность на тестовом подмножестве оказалась значительно ниже, поскольку сеть начинает маркировать как березу каждый объект, похожий на дерево. При



**Рис. 2.** Пример определения на изображении дерева породы береза повислая

**Fig. 2.** An example of determining on the image of a European white birch tree species

этом при обучении на фотографиях, содержащих не только березу, нейронная сеть не всегда точно определяла это дерево.

Следовательно, важны фотоизображения обоих характеров, причем изображения с присутствием иных пород еще важнее. Отметим, что точность определения повышается с увеличением размера датасета.

В целях демонстрации результатов дообученная на всем датасете модель была использована для определения деревьев березы на фотографиях, выполненных в дендропарке МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал) (рис. 2).

## Выводы

Рассмотренная технология может использоваться в широком спектре различных задач [23, 24], в частности при таксации лесных массивов [25] с дообучением модели на предмет других пород деревьев. Кроме того, технологию можно применить для выделения областей с деревом березы для дальнейших обработок изображений [26, 27]. Технология может служить для пополнения общих датасетов в сообществе разработчиков, для первичной обработки в системах, целью которых является выявление фотоизображения с деревом березы для получения желаемых результатов, для фильтрации среды посторонних объектов.

К тому же возможности технологии позволяют осуществлять обработку в режиме реального времени [28–30] и решать задачи с крайне незначительными доработками.

## Список литературы

- [1] RoboCraft. SLAM. URL: <http://robocraft.ru/blog/technology/724.html> (дата обращения 30.04.2022).
- [2] Review: YOLOv1 – You Only Look Once (Object Detection). URL: <https://towardsdatascience.com/yolov1-you-only-look-once-object-detection-e1f3ffec8a89> (дата обращения 21.04.2022).
- [3] Batch-normalization. URL: <http://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=Batch-normalization> (дата обращения 10.05.2022).
- [4] Redmon J., Farhadi A. YOLOv3: An Incremental Improvement, 2018. URL: <https://arxiv.org/abs/1804.02767> (дата обращения 30.04.2022).
- [5] Convex Hull, (Minimum) Bounding Box, and Minimum Enclosing Circle. URL: <http://dwwoll.de/rexrepos/posts/diagBounding.html> (дата обращения 10.05.2022).
- [6] YOLO: Real-Time Object Detection. URL: <https://pjreddie.com/darknet/yolo/> (дата обращения 30.04.2022).
- [7] Szegedy C., Lofe S., Vanhoucke V., Alemi A. Inception-v4, Inception-ResNet and the Impact of Residual Connections on Learning, 2016. URL: <https://arxiv.org/abs/1602.07261v2>
- [8] Chowdhury A.P., Kulkarni P., Bojnordi M.N. MB-CNN: Memristive binary convolutional neural networks for embedded mobile devices // J. of Low Power Electronics and Applications, 2018, no. 8(4), p. 38. DOI: 10.3390/JLPEA8040038
- [9] Neural Processing Unit. URL: <https://www.pcmag.com/encyclopedia/term/neural-processing-unit> (дата обращения 22.04.2022).
- [10] Arakawa Y., Matsuda Y. Gamification Mechanism for Enhancing a Participatory Urban Sensing: Survey and Practical Results // J. of Information Processing, 2016, no. 24(1), pp. 31–38. DOI:10.2197/ipsjip.24.31
- [11] Yasumoto K., Yamaguchi H., Shigeno H. Survey of real-time processing technologies of iot data streams // J. of Information Processing, 2016, no. 24(2), pp. 95–202.
- [12] Abadi M., Agarwal A., Barham P., Brevdo E., Chen Z., Citro C., Corrado G.S., Davis A., Dean J., Devin M. Tensorflow: Large-scale machine learning on heterogeneous distributed systems, 2016. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1603.04467> (дата обращения 11.05.2022).
- [13] Piccardi M. Background subtraction techniques: a review // Conference: Systems, Man and Cybernetics IEEE International Conference on Volume: 4, 2004. DOI:10.1109/ICSMC.2004.1400815
- [14] Viola P., Jones M. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features // February 2001. Proceedings / CVPR, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, no. 1, pp. I–511 – I–518, vol. 1. DOI:10.1109/CVPR.2001.990517
- [15] Team O. Opencv. URL: <https://opencv.org> (дата обращения 22.04.2022).
- [16] LeCun Y., Haffner P., Bottou L., Bengio Y. Object recognition with gradient-based learning. Palermo, Sicily: Springer Verlag, 1999, pp. 319–345
- [17] Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks Advances//Neural Information Processing, 2012, no. 25(2). DOI:10.1145/3065386
- [18] Litjens G., Kooi T., Bejnordi B.E., Setio A.A.A., Ciompi F., Ghafoorian M., Van Der Laak J.A., Van Ginneken B., Sanchez C.I. A survey on deep learning in medical image analysis // Medical Image Analysis, 2017, no. 42, pp. 60–88.

- [19] Han J., Zhang D., Cheng G., Liu N., Xu D. Advanced deep learning techniques for salient and category-specific object detection: a survey // *IEEE Signal Processing Magazine*, 2018, pp. 84–100. DOI:10.1109/MSP.2017.2749125
- [20] Simonyan K., Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition, 2014. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.1556>
- [21] Szegedy C., Liu W., Jia Y., Sermanet P., Reed S., Anguelov D., Erhan D., Vanhoucke V., Rabinovich A. Going deeper with convolutions // *Conference: 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2015. DOI:10.1109/CVPR.2015.7298594
- [22] Liu W., Anguelov D., Erhan D., Szegedy C., Reed S., Fu C.-Y., Berg A.C. Ssd: Single shot multibox detector // *Conference: European Conference on Computer Vision*, 2016. DOI:10.1007/978-3-319-46448-0\_2
- [23] Howard A.G., Zhu M., Chen B., Kalenichenko D., Wang W., Weyand T., Andreetto M., Adam H. Mobilenets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications, 2017. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1704.04861>
- [24] Redmon J., Farhadi A. Yolov3: An incremental improvement, 2018. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1804.02767>
- [25] Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You only look once: Unified, real-time object detection // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2016. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1506.02640>
- [26] Bewley A., Ge Z., Ott L., Ramos F., Upcroft B. Simple online and realtime tracking // *Image Processing (ICIP), IEEE International Conference*, 2016, pp. 3464–3468. DOI:10.1109/ICIP.2016.7533003
- [27] Kalman R.E. A new approach to linear filtering and prediction problems // *J. of Basic Engineering (American Society of Mechanical Engineers)*, 1960, vol. 82, iss. 1, pp. 35–45. DOI:10.1115/1.3662552
- [28] Kuhn H.W. The hungarian method for the assignment problem // *Naval research logistics quarterly*, 1955, no. 2(1), pp. 83–97. <http://dx.doi.org/10.1002/nav.3800020109>
- [29] Lazorenko A. Tensorflow performance test: Cpu vs gpu, 2017. URL: <https://medium.com/@andriylazorenko/tensorflow-performance-test-cpu-vs-gpu-79fcd39170c> (дата обращения 10.04.2022).
- [30] Ouaknine A. Review of Deep Learning Algorithms for Object Detection, 2018. URL: <https://medium.com/zylapp/review-of-deep-learning-algorithms-for-object-detection-c1f3d437b852> (дата обращения 21.04.2022).

## Сведения об авторах

**Войтов Даниил Юрьевич**✉ — инженер ИЦ «АР» МГТУ им. Н.Э. Баумана, leonickss@yandex.ru  
**Васильев Сергей Борисович** — канд. с.-х. наук, доцент, зав. кафедрой лесных культур, селекции и дендрологии ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал)», svasilyev@mgul.ac.ru  
**Кормилицын Дмитрий Владимирович** — аспирант кафедры лесных культур, селекции и дендрологии ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал)», gurkordmi@gmail.com

Поступила в редакцию 28.06.2022.

Одобрено после рецензирования 13.09.2022.

Принята к публикации 16.11.2022.

# TECHNOLOGY DEVELOPMENT FOR DETERMINING TREE SPECIES USING COMPUTER VISION

D.Y. Voytov<sup>1</sup>✉, S.B. Vasil'ev<sup>2</sup>, D.V. Kormilitsyn<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Engineering Center «Automation and Robotics» BMSTU, 5, build. 1, 2nd Baumanskaya st., 105005, Moscow, Russia

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

leonickss@yandex.ru

A technology has been developed to determine the European white birch (*Betula pendula* Roth.) species in the photo. The differences of the known neural networks of classifiers with the definition of objects are studied. YOLOv4 was chosen as the most promising for further development of the technology. The mechanism of image markup for the formation of training examples has been studied. The method of marking on the image has been formed. Two different datasets have been formed to retrain the network. An algorithmic increase in the dataset was carried out by transforming images and applying filters. The difference in the results of the classifier is determined. The accuracy when training exclusively on images containing hanging birch was 35 %, the accuracy when training on a dataset containing other trees was 71 %, the accuracy when training on the entire dataset was 75 %. To demonstrate the work, birch trees were identified in photographs taken in the arboretum of the MF Bauman Moscow State Technical University. To improve the technology, additional training is recommended to determine the remaining tree species. The technology can be used for the implementation of taxation of specific tree species; the formation of marked datasets for further development; the primary element in the tree image analysis system, to exclude third-party objects in the original image.

**Keywords:** computer vision, hanging birch, taxation, YOLO, neural networks

**Suggested citation:** Voytov D.Yu., Vasil'ev S.B., Kormilitsyn D.V. *Razrabotka tekhnologii opredeleniya porody derev'ev s primeneniem komp'yuternogo zreniya development of technology for determining tree species using computer vision* [Technology development for determining tree species using computer vision]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 1, pp. 60–66. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-60-66

## References

- [1] RoboCraft. SLAM. Available at: <http://robocraft.ru/blog/technology/724.html> (accessed 30.04.2022).
- [2] Review: YOLOv1 – You Only Look Once (Object Detection). Available at: <https://towardsdatascience.com/yolov1-you-only-look-once-object-detection-e1f3ffec8a89> (accessed 21.04.2022).
- [3] Batch-normalization. Available at: <http://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=Batch-normalization> (accessed 10.05.2022).
- [4] Redmon J., Farhadi A. YOLOv3: An Incremental Improvement, 2018. Available at: <https://arxiv.org/abs/1804.02767> (accessed 30.04.2022).
- [5] Convex Hull, (Minimum) Bounding Box, and Minimum Enclosing Circle. Available at: <http://dwoell.de/rexrepos/posts/diagBounding.html> (accessed 10.05.2022).
- [6] YOLO: Real-Time Object Detection. Available at: <https://pjreddie.com/darknet/yolo/> (accessed 30.04.2022).
- [7] Szegedy C., Loffe S., Vanhoucke V., Alemi A. Inception-v4, Inception-ResNet and the Impact of Residual Connections on Learning, 2016. Available at: <https://arxiv.org/abs/1602.07261v2>
- [8] Chowdhury A.P., Kulkarni P., Bojnordi M.N. MB-CNN: Memristive binary convolutional neural networks for embedded mobile devices. *J. of Low Power Electronics and Applications*, 2018, no. 8(4), p. 38. DOI: 10.3390/JLPEA8040038
- [9] Neural Processing Unit. Available at: <https://www.pcmag.com/encyclopedia/term/neural-processing-unit> (accessed 22.04.2022).
- [10] Arakawa Y., Matsuda Y. Gamification Mechanism for Enhancing a Participatory Urban Sensing: Survey and Practical Results. *J. of Information Processing*, 2016, no. 24(1), pp. 31–38. DOI:10.2197/ipsjip.24.31
- [11] Yasumoto K., Yamaguchi H., Shigeno H. Survey of real-time processing technologies of iot data streams. *J. of Information Processing*, 2016, no. 24(2), pp. 95–202.
- [12] Abadi M., Agarwal A., Barham P., Brevdo E., Chen Z., Citro C., Corrado G.S., Davis A., Dean J., Devin M. Tensorflow: Large-scale machine learning on heterogeneous distributed systems, 2016. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1603.04467> (accessed 11.05.2022).
- [13] Piccardi M. Background subtraction techniques: a review. Conference: Systems, Man and Cybernetics IEEE International Conference on Volume: 4, 2004. DOI:10.1109/ICSMC.2004.1400815
- [14] Viola P., Jones M. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. February 2001. Proceedings / CVPR, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, no. 1, pp. 1–511 – 1–518 vol. 1. DOI:10.1109/CVPR.2001.990517
- [15] Team O. Opencv. Available at: <https://opencv.org> (accessed 22.04.2022).
- [16] LeCun Y., Haffner P., Bottou L., Bengio Y. Object recognition with gradient-based learning. Palermo, Sicily: Springer Verlag, 1999, pp. 319–345
- [17] Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks *Advances // Neural Information Processing*, 2012, no. 25(2). DOI:10.1145/3065386
- [18] Litjens G., Kooi T., Bejnordi B.E., Setio A.A.A., Ciampi F., Ghahfoorian M., Van Der Laak J.A., Van Ginneken B., Sanchez C.I. A survey on deep learning in medical image analysis // *Medical Image Analysis*, 2017, no. 42, pp. 60–88.
- [19] Han J., Zhang D., Cheng G., Liu N., Xu D. Advanced deeplearning techniques for salient and category-specific object detection: a survey // *IEEE Signal Processing Magazine*, 2018, pp. 84–100. DOI:10.1109/MSP.2017.2749125

- [20] Simonyan K., Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition, 2014. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.1556>
- [21] Szegedy C., Liu W., Jia Y., Sermanet P., Reed S., Anguelov D., Erhan D., Vanhoucke V., Rabinovich A. Going deeper with convolutions. Conference: 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2015. DOI:10.1109/CVPR.2015.7298594
- [22] Liu W., Anguelov D., Erhan D., Szegedy C., Reed S., Fu C.-Y., Berg A.C. Ssd: Single shot multibox detector. Conference: European Conference on Computer Vision, 2016. DOI:10.1007/978-3-319-46448-0\_2
- [23] Howard A.G., Zhu M., Chen B., Kalenichenko D., Wang W., Weyand T., Andreetto M., Adam H. Mobilenets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications, 2017. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1704.04861>
- [24] Redmon J., Farhadi A. Yolov3: An incremental improvement, 2018. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1804.02767>
- [25] Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You only look once: Unified, real-time object detection. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1506.02640>
- [26] Bewley A., Ge Z., Ott L., Ramos F., Upcroft B. Simple online and realtime tracking. Image Processing (ICIP), IEEE International Conference, 2016, pp. 3464–3468. DOI:10.1109/ICIP.2016.7533003
- [27] Kalman R.E. A new approach to linear filtering and prediction problems. J. of Basic Engineering (American Society of Mechanical Engineers), 1960, vol. 82, iss. 1, pp. 35–45. DOI:10.1115/1.3662552
- [28] Kuhn H.W. The hungarian method for the assignment problem. Naval research logistics quarterly, 1955, no. 2(1), pp. 83–97. <http://dx.doi.org/10.1002/nav.3800020109>
- [29] Lazorenko A. Tensorflow performance test: Cpu vs gpu, 2017. Available at: <https://medium.com/@andriylazorenko/tensorflow-performance-test-cpu-vs-gpu-79fcd39170c> (accessed 10.04.2022).
- [30] Ouaknine A. Review of Deep Learning Algorithms for Object Detection, 2018. Available at: <https://medium.com/zylapp/review-of-deep-learning-algorithms-for-object-detection-c1f3d437b852> (accessed 21.04.2022).

## Authors' information

**Voytov Daniil Yur'evich** ✉ — Engineer, Engineering Center «Automation and Robotics» BMSTU, [leonickss@yandex.ru](mailto:leonickss@yandex.ru)

**Vasil'ev Sergey Borisovich** — Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), [svasilyev@mgul.ac.ru](mailto:svasilyev@mgul.ac.ru)

**Kormilitsyn Dmitriy Vladimirovich** — pg. of the BMSTU (Mytishchi branch), [gurkordmi@gmail.com](mailto:gurkordmi@gmail.com)

Received 28.06.2022.

Approved after review 13.09.2022.

Accepted for publication 16.11.2022.

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

## ВОСТОЧНЫЙ МАЙСКИЙ ХРУЩ — НЕСКОЛЬКО ЗАБЫТАЯ, НО ВНОВЬ РЕАЛЬНАЯ УГРОЗА

Ю.И. Гниненко✉, Я.В. Цуканов, Д.Е. Галич, И.Я. Чеплянский

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

gninenko-yuri@mail.ru

Дан анализ значения восточного майского хруща как опасного вредителя леса в России. Длительное время он являлся основным препятствием для успешного создания лесных культур в ряде регионов страны, в частности в Поволжье и на юге Западной Сибири. Показано, что, несмотря на это, не было сформулировано определение, что же такое очаг массового размножения хруща. Ранее были предложены и найдены широкое применение различные технологии защиты от хрущей, которые включали в себя как применение средств химии, так и лесохозяйственных мер. Это привело к существенному снижению опасности от этого вредителя и с конца XX века хрущ для работников лесного хозяйства перестал быть значимой причиной для проведения мер защиты. В настоящее время вновь складываются благоприятные условия для начала формирования крупных очагов этого вредителя. Предложены определения для таких понятий, как «очаг массового размножения» и «очаг вредоносности» хруща и указано на отсутствие современных препаратов и технологий для защиты от этого вредителя.

**Ключевые слова:** восточный майский хрущ, очаги массового размножения, меры защиты

**Ссылка для цитирования:** Гниненко Ю.И., Цуканов Я.В., Галич Д.Е., Чеплянский И.Я. Восточный майский хрущ — несколько забытая, но вновь реальная угроза // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 1. С. 67–74. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-67-74

Восточный майский хрущ *Melolontha hippocastani* Fabricius, 1801 (Coleoptera. Scarabaeidae) является одним из наиболее известных и опасных вредителей леса. Когда такой вредитель, как сибирский коконопряд был еще только впервые описан С.С. Четвериковым в качестве нового для науки вида, восточный майский хрущ уже давно был известен, и для защиты от него уже были разработаны разные мероприятия, которые успешно проводились.

В своем фундаментальном труде о лесных насекомых [1] Ратцебург писал об ущербе от майского хруща как о совершенно очевидном и широко известном факте. В первых российских книгах по лесному делу также обращалось внимание на огромный ущерб, который наносит лесам этот вредитель [2–4]. Таким образом, уже в течение XIX в. было хорошо известно об опасности хруща.

Ф.К. Арнольд в известном труде «Русский лес» [5] пишет, что «личинка майского жука — опасный и почти непобедимый враг». В Наставлении 1938 г. [6] в первом параграфе написано: «хрущи являются опаснейшими вредителями леса, препятствующими естественному и искусственному возобновлению и разведению леса...».

Вместе с тем хруща всегда рассматривали как объект борьбы. Всем по умолчанию, было ясно,

что это опасный вредитель, который размножается повсеместно там, где для него есть подходящие условия. Численность особей хруща почти постоянно настолько высока, что были даже разработаны способы сбора жуков и их утилизации.

Майский хрущ повсеместно и постоянно был очень многочисленным, что позволило ему наносить большой ущерб лесам, особенно искусственно создаваемым посадкам, тем не менее исследователи не ставили вопрос об особенностях динамики его численности. Проведение эффективных мер борьбы с вредителем и разработка технологии лесовосстановления на площадях, заселенных хрущом, способствовали постепенному затуханию вспышек его массового размножения. Уже с конца XX в. лесоводы перестали рассматривать его как опасного вредителя.

Кризис в развитии страны на рубеже XIX и XX вв. привел к накоплению довольно больших по площади пустырей и не облесившихся заброшенных полей, гарей и вырубок. Это создало условия для возобновления роста численности особей хруща, однако не привлекло внимания лесоводов. Вскоре все больше стали появляться сведения о погибших сосновых посадках, в качестве причин гибели которых указывали исключительно природные явления. Проведенные нами специальные исследования показали, что причиной гибели посадок во многих случаях является распространение личинок хруща.

## Цель работы

Цель работы — привлечение внимания специалистов к вновь возникшей проблеме распространения очагов заражения хрущом и попытка разработки терминологической базы для создания системы мониторинга возникновения и развития очагов этого вредителя.

## Методы и объекты исследования

Специальные поисковые обследования были проведены в августе 2021 г. в искусственных посадках сосны и дуба в Ростовской, Тюменской и Курганской областях в целях установления факта наличия личинок хрущей в почве.

В каждом выбранном для обследования участке в разных его частях было заложено три ямы размером 0,5 и 1 м<sup>2</sup>, глубиной 0,25 м. Ямы закладывали как в пределах проекций крон, так и в межкрупных пространствах.

Кроме такого, проведена оценка уровня уничтожения листвы майскими жуками в кронах дубов в культурах Шолоховского государственного автономного учреждения Ростовской области «Лес» (ГАУ РО «Лес»). Визуально оценивали степень объедания листвы насекомыми. По каждому пункту наблюдений описывали таксационные характеристики древостоев и их реальное состояние на момент проведения работ.

Для характеристики интенсивности лёта майских жуков нами предложен метод учета, прилетающих особей на модельную ветку длиной 1 м в течение 15 мин наблюдения. При этом учитывали число всех жуков, которые после прилета начали питание, а также и тех, которые, прилетев на учетную ветку, не приступая к питанию, покинули ее.

Кроме полевых работ проведен анализ динамики формирования очагов хруща по материалам, имеющимся в официальных отчетных документах Федерального агентства лесного хозяйства (Рослесхоза) и Российского центра защиты леса.

## Результаты и обсуждение

В мае 2021 г. проведены учеты объедания жуками крон в посадках дуба в Шолоховском ГАУ РО «Лес» (табл. 1).

Проведенные учеты показали, что дуб в сильной степени пострадал в результате интенсивного поедания листвы жуками. Фактически уровень нанесения повреждений кронам таков, что если рассматривать хруща в качестве листогрызущего вредителя, то все эти участки следует признать действующими очагами. Однако возраст древостоев на обследованных участках составляет 70 лет, и хрущ как почвообитающий вредитель уже не может нанести таким крупным деревьям заметный ущерб при повреждении корней.

Т а б л и ц а 1

### Объедание листвы жуками хруща в кронах дуба возрастом 70 лет в Шолоховском ГАУ РО «Лес» (Вешенское участковое лесничество)

Foliage consumption with beetles in oak crowns aged 70 years in the Sholokhov GAU RO «Les» (Veshenskoye district forestry)

Местоположение участка	Площадь выдела, га	Таксационная характеристика	Дефолиация дуба, %	Интенсивность лёта жуков, экз./ветвь
Кв. 75, выд. 6	4,8	9Дч1Яз+Кля 14 м, 20 см; подрост дуба редкий крупный	75; подрост — 50	250,2 ± 10,4
Кв. 75, выд. 11	0,6	8Дч2Со 15 м, 18 см	75	120,3 ± 5,8
Кв. 75, выд. 20	1,3	8Дч2Со 14 м, 20 см	70	135,5 ± 6,5
Кв. 75, выд. 24	6,6	9Дч1Со 14 м, 19 см	85	135,7 ± 12,4
Кв. 75, выд. 35	1,6	8Дч2Со 15 м, 20 см	70	135,9 ± 16,2

Так как он обитает на опушках леса и полянах, довольно трудно определить, по каким признакам и показателям следует вести учеты таких участков в качестве очагов вредителя.

Ранее неоднократно проводились истребительные меры по питающимся листвой жукам. В настоящее время нормативные документы предусматривают возможность проведения мер защиты лиственных лесов только в таких случаях, когда повреждения, наносимые листогрызущими вредителями, угрожают гибелью древостою. Если следовать такому правилу, то в настоящее время невозможно проведение мер борьбы с жуками, во-первых, потому, что участки, где жуки питаются, не являются очагами массового размножения, во-вторых, потому, что повреждения жуков, даже очень сильные, не ведут к возникновению угрозы гибели древостоя кормовых пород.

Почвенные раскопки показали, что число личинок хрущей в почве очень велико и есть все основания считать, что хрущ в регионах, в которых обследования проведены, уже формирует очаги массового размножения (табл. 2).

Таким образом, поисковые обследования показали, что в некоторых регионах России началось формирование очагов массового размножения восточного майского хруща. Причем такие места формирующихся очагов охватывают как старые культуры дуба черешчатого, так и посадки сосны крымской и сосны обыкновенной.

Вместе с тем в ходе работы в очагах хрущей возникло понимание того, что четкого определения,

## Поисковые обследования в искусственных посадках сосны и дуба в августе 2021 г.

## Search surveys in pine and oak man-made plantations in August 2021

Место проведения обследования	Краткая характеристика древостоя	Площадь, га	Число личинок в почве, экз./м <sup>2</sup>
Ростовская область, Шолоховское ГАУ РО «Лес»			
Вешенское участковое лесничество кв. 75, выд. 6 кв. 75, выд. 20	Сомкнутые лесные культуры дуба, 1951 г. создания	4,8	9,0 ± 1,2
	То же	1,3	12,0 ± 2,3
Колундаевское участковое лесничество кв. 46, выд. 11 кв. 46, выд. 3	Лесные культуры сосны крымской 2019 г. создания на вырубке 2012 г.	2,8	23,0 ± 5,8
	То же	1,1	2,0 ± 0,5
Тюменская область, Тюменское лесничество			
Винзилинское участковое лесничество, кв. 48, выд. 12.	Лесные культуры сосны обыкновенной, посадка 2016 г.	6,0	16,0 ± 3,4
Богандинское участковое лесничество, кв. 59, выд. 17	Лесные культуры сосны обыкновенной, посадка 2015 г.	16,7	18,0 ± 5,2
Курганская область			
Шатровское участковое лесничество, кв. 8, выд. 6.	Лесные культуры сосны обыкновенной, посадка 2013 г.	3,0	2,0 ± 0,4

какие территории считать очагами хруща, в отечественной литературе нет.

Крайне сложно изучать динамику численности хруща и особенности формирования его очагов, когда отсутствует четкое определение очага массового размножения этого вредителя. В литературных источниках и в официальных отчетных документах имеется много данных о том, в каких регионах и в какие годы действовали очаги майского хруща. Но нет также определения, какой участок леса следует считать очагом.

Ранее с хрущом не только проводили мероприятия по борьбе на огромных площадях, но и вели детальный надзор за изменениями численности его особей [7, 8]. Были разработаны предложения по ведению лесного хозяйства в зонах вокруг очагов. Например, А.Р. Чистяков в работе [9] писал: «В действующих очагах майского хруща и в защитной зоне вокруг них следует воздержаться от проведения обычных санитарных рубок ...», а также: «В действующих очагах майского хруща и защитной зоне вокруг них (3 км) ...» [9]. Довольно трудно очертить защитную зону вокруг очага, если не понятно, какие же территории следует относить к очагам.

По-видимому, те или иные территории признавали очагами, не утруждая себя необходимостью четко сформулировать понятие очага массового размножения восточного майского хруща. Однако следует признать, что есть несколько вполне понятных трудностей, не позволяющих дать четкое определение этому понятию. Во-первых, биология майского хруща такова, что его личинки вредят в одном месте, а жуки могут питаться в других местах и наносить при этом довольно сильные повреждения кронам. Не ясно, что же

относить к такому понятию как очаг — места жизни и питания личинок или места питания взрослых особей, тем более что часто эти территории не совпадают. Во-вторых, повышенная численность личинок характерна как для почвы опушек, полян и редины в естественных лесах, где вред от их питания не столь заметен, так и на лесокультурных площадях, где их вред очень заметен и имеет большое хозяйственное значение.

Таким образом, отсутствие определения понятия очага массового размножения майского хруща (так же, как и других хрущей) хоть и объяснимо, но затрудняет принятие решений о проведении любых защитных мероприятий.

Для того, чтобы вывести формулировку понятия «очаг массового размножения хруща» следует учесть, что территории с повышенной численностью особей хруща, как мы отметили выше, могут территориально не совпадать с территориями, на которых заметна вредоносная деятельность личинок. Повышенная численность личинок в почве опушек, редины, полян может оставаться незамеченной для работников лесозащиты или лесного хозяйства. Уничтожение личинками самосева или подроста наносит ущерб, который влияет на процессы естественного лесовосстановления. По-видимому, имеет смысл разделить такие понятия, как динамика численности особей хруща и связанные с этим закономерности развития вспышек в его естественных местах обитания, а также формирование очагов его массового размножения в искусственных лесных посадках и связанное с этим формирование очагов вредоносности.

В естественных условиях хрущ обитает в разных частях своего обширного ареала в разных стадиях. Здесь его личинки питаются корнями

различных растений, однако ущерб от наносимых повреждений не учитывается. Но тогда, когда хрущ проникает в культуры, формируются очаги его вредоносности.

В связи с этим предлагаем различать динамику численности особей хруща в местах его естественного обитания и динамику формирования очагов вредоносности. При этом важно следить за динамикой численности хруща и развитием очагов его массового размножения в местах естественного обитания. В таких местах следует закладывать постоянные участки по ведению детального надзора за вредителем. На этих участках необходимо ежегодно получать следующие сведения:

- уровень численности личинок разных возрастов;
- состояние личинок и причины, вызывающие их патологию.

Это позволит прогнозировать развитие массового размножения хруща в конкретном регионе. В таких местах не планируется проведение мер борьбы с хрущами, так как экономический ущерб от него здесь минимален.

Повышенную численность личинок на лесокультурных площадях, как показали наши исследования, в последние годы не замечают ни работники лесозащиты, ни работники лесного хозяйства. Это не свидетельствует о том, что хрущ не наносит ущерб, поскольку легче списать неудачи с культурами на воздействие «засух и суховеев», чем проводить весь комплекс защитных мероприятий.

Считаем, что очагами массового размножения хрущей следует считать места его естественного обитания, на которых численность личинок превышает 0,5 экз./м<sup>2</sup>. Очаги могут быть формирующимися, действующими и затухающими.

Формирующимся очагом являются территории, на которых численность личинок составляет от 0,2 до 0,5 экз./м<sup>2</sup>.

Действующим очагом массового размножения хруща следует считать территории, на которых численность личинок превышает 0,5 экз./м<sup>2</sup> почвы.

Очаги майского хруща практически всегда являются хроническими, т. е. такими, которые действуют в течение нескольких лет на одной территории.

Вести регулярные наблюдения за динамикой численности хруща следует в местах его естественного обитания. Результаты таких наблюдений дают основания считать, насколько велика угроза формирования очагов вредоносности в создаваемых культурах. И если уровень численности хруща в таких местах повышен, то создание искусственных посадок без выполнения комплекса защитных мероприятий не допустимо.

Участки, намеченные под создание лесных культур, и лесокультурные площади в том случае, если в почве численность личинок превосходит критические величины, установленные для определенных типов почв в конкретных регионах, следует относить к очагам вредоносности хруща и в них следует выполнять необходимый комплекс защитных мероприятий.

Отдельно стоят территории, на которых жуки проходят дополнительное питание в кронах лиственных деревьев. Такие места не являются очагами массового размножения и очагами вредоносности. Их следует рассматривать только в качестве мест питания жуков.

Таким образом, мы предлагаем вести детальный лесопатологический мониторинг майского хруща в местах его естественного обитания. Даже при высокой численности личинок эти участки не следует учитывать в качестве очагов массового размножения хруща. При этом знание реального уровня численности личинок и тенденций его изменения позволяет адекватно оценивать угрозу от этого вредителя.

Учитывать следует очаги вредоносности хруща, т. е. площади лесных культур, в которых вредитель наносит повреждения, и площади, намечаемые для создания культур.

Официальные процедуры учета площадей очагов повышенной численности личинок хруща на опушках, в редианах и на полянах не имеет смысла, так как даже при исключительно высокой численности личинок в таких местах обитания, в них не будут проведены меры борьбы. Однако вести детальный надзор за изменением численности хруща в таких условиях крайне необходимо. Имея данные о численности личинок в таких местах, можно прогнозировать интенсивность лета его жуков каждый год и планировать назначение мер защиты создаваемых культур.

Следует также остановиться на том, почему после длительного периода, когда хрущ не проявлял себя в качестве массового вредителя, вновь наступает период его высокой вредоносности. Ранее исследователи [10, 11] воспринимали очаги хруща, как некую постоянную данность, когда необходимо решать вопросы защиты от него, а не рассматривать гипотетические вопросы о причинах образования таких очагов.

Со временем появилась уверенность в том, что причиной возникновения крупных очагов хруща является следствие ошибок в ведении лесного хозяйства. Так, А.А. Нефедьев указывал, что крупные очаги хруща в пределах нынешней Республики Марий Эл возникли в 1921 г. в силу таких причин, как крупные пожары, проведение концентрированных рубок в военные и послевоенные годы, а также крупный бурелом 1948 г.

«Лесоводы приступили к их закультивированию в больших масштабах только с 1950 года» [12]. Н.П. Павлинов также считал, что причиной возникновения очагов хруща являются «прежде всего, несвоевременность закультивирования крупных гарей, ветровальников» [13].

А.И. Воронцов считал, что до войны в лесном хозяйстве велся надзор за развитием хруща, но «отказ от этой работы в послевоенные годы привел к «неожиданному» появлению ряда огромных площадей, сильно заселенных хрущом, и к массовой гибели культур» [14].

Это мнение было подтверждено в Рекомендациях 1980 г.: «Восточный майский хрущ является одним из опаснейших вредителей леса. Очаги его массового размножения возникают на необлесенных своевременно вырубках, горельниках, пустырях, а также в несомкнувшихся молодых культурах и естественных молодняках» [8]. В этой записи уже ясно видно, что вопросы возникновения очагов стали предметом обсуждения в среде работников лесного хозяйства и защиты леса.

Таким образом, в середине XX в. осознали, что основными причинами формирования очагов массового размножения хруща являются следующие:

- накопление не облесившихся таких территорий, как старые гари, ветровальники и старые лесосеки;
- неслежение за динамикой численности хруща;
- создание культур без надлежащей защиты, в результате чего появлялись новые места массового размножения вредителя.

Понимание причин возникновения очагов сделало возможным разработку и дальнейшее проведение успешных мер по борьбе с вредителем.

В настоящее время мы столкнулись с ситуацией, очень близкой к той, которая стала причиной формирования крупных очагов хруща в середине XX в. После кризисного развития страны в конце XX в. и в начале XXI в. увеличилось количество пустырей заброшенных малопродуктивных сельскохозяйственных земель, постепенно зарастающих лесом, необлесенных гарей. Вследствие прекращения работ по обследованию лесокультурных площадей накопились лесные культуры с повышенной численностью личинок хрущей. Это напомнило ситуацию первой половины XX в. и позволяет предположить, что в ближайшие годы следует ожидать выявления новых крупных очагов хрущей, в том числе и очагов его вредности в культурах в разных регионах страны.

Усиление вредной деятельности хрущей накладывается на отсутствие необходимых современных технологий защиты от него. Их разработка займет как минимум 3–5 лет, поэтому пока очаги будут беспрепятственно развиваться. Динамика массового размножения и биология хруща

таковы, что его очаги будут действовать на одних и тех же площадях не менее 4–8 лет. Следовательно, в лесном хозяйстве России вновь складывается ситуация, при которой майский хрущ станет основным вредителем, препятствующим лесовосстановлению. Такая ситуация продержится не менее 10–15 лет в том случае, если уже в ближайшие 2–3 года будут испытаны новые пестициды и разработаны современные технологии их применения. Если же работа в этом направлении затянется, то период большой вредности хруща может растянуться на 25 лет и более.

## Выводы

Восточный майский хрущ, который длительное время — с XIX и до конца XX вв. был основным вредителем лесов, в настоящее время вновь начал формирование очагов в ряде регионов России. Это делает вероятным возникновение трудностей с воспроизводством лесов в нескольких регионах страны, где в ближайшие годы будет невозможным успешное создание лесных культур без проведения комплекса мер по защите от хруща.

*Исследование проведено в рамках выполнения плановых работ по теме НИР «Разработка технологий защиты сосновых культур от майского хруща и других почвообитающих вредителей» государственного задания ФБУ ВНИИЛМ на 2021–2023 гг.*

## Список литературы

- [1] Ratzenurg J.T.C. Die Forst-Insecten jder Abbildung und Beschreibung. Erste Theil. Die Käfer. Berlin: Nicolaische Buchhandlung, 1839, 309 p.
- [2] Семенов В. Лесоохранение. Руководство для офицеров корпуса лесничих. СПб.: Тип. М-ва гос. имуществ, 1843. 55 с.
- [3] Рудзкий А. Справочная книга для лесничих. Ч. 1 Лесоохранение. СПб.: Тип. Я. Троя, 1868. 195 с.
- [4] Баранецкий П.В. Лесоохранение. Книга для лесовладельцев, лесничих и слушателей учебных лесных заведений. СПб.: Тип. А.С. Суворина, 1880. 312 с.
- [5] Арнольд Ф.К. Русский лес. Т. 2. Ч. 1. СПб.: Издание А.Ф. Маркса, 1898. 705 с.
- [6] Наставление по борьбе с майским хрущом в лесах водоохранной зоны. М.: Изд-во Главного управления лесоохраны и лесонасаждений при СНК СССР, 1938. 27 с.
- [7] Пересина Т.В. Надзор за майским хрущом в Ульяновской области // Борьба с восточным майским хрущом: материалы к науч.-техн. совещанию 17–20 августа 1971 г. Пушкино: Изд-во ВНИИЛМ, 1971. С. 35–40.
- [8] Рекомендации по интегрированной борьбе с восточным майским хрущом. М.: ВНИИЛМ, 1980. 28 с.
- [9] Чистяков А.Р. Лесоводственные мероприятия при производстве лесных культур в очагах майского хрущом // Борьба с восточным майским хрущом: материалы к науч.-техн. совещанию 17–20 августа 1971 г. Пушкино: Изд-во ВНИИЛМ, 1971. С. 74–79.
- [10] Ильючек Н.С., Розанов Г.А. Лекции для лесной стражи (краткий курс). Казань: Изд-во Татотдела союза с.-х. и лесных рабочих, 1927. 146 с.

- [11] Холодковский Н.А. Курс энтомологии теоретической и прикладной. СПб.: Изд. А.Ф. Девриена, 1912, 508 с.
- [12] Нефедьев А.А. Опыт создания лесных культур на захрущевленных площадях в Марийской АССР // Борьба с восточным майским хрущом: материалы к научно-техническому совещанию 17–20 августа 1971 г. Пушкино: Изд-во ВНИИЛМ, 1971. С. 25–20.
- [13] Павлинов Н.П. Восточный майский хрущ в лесах РСФСР и неотложные мероприятия по борьбе с ним // Борьба с восточным майским хрущом: материалы к науч.-техн. совещанию 17–20 августа 1971 г. Пушкино: Изд-во ВНИИЛМ, 1971. С. 31–34.
- [14] Воронцов А.И. Экологические основы современной системы мероприятий по борьбе с восточным майским хрущом // Борьба с восточным майским хрущом: материалы к научно-техническому совещанию 17–20 августа 1971 г. Пушкино: Изд-во ВНИИЛМ, 1971. С. 16–21.
- [15] Бессчетнов В.П., Бессчетнова Н.Н., Быченкова Т.Н., Клишина Л.И., Храмова О.Ю., Печникова Н.Д. Заселенность гарей на территории керженского заповедника личинками восточного майского хруща // Тр. Государственного природного биосферного заповедника «Керженский»: сб. статей. Нижний Новгород: Изд-во Министерства природных ресурсов и экологии РФ; Государственного природного биосферного заповедника «Керженский», 2014. С. 142–152.
- [16] Шутяев А.М. Материалы к биологии и экологии майского хруща в условиях центрально-черноземного заповедника // Зоологический журнал, 1958. Т. 37. № 11. С. 1659–1667.
- [17] Niemczyk M., Neyko I. Methods of restrictions in the number of cockchafer population in the forestry of Poland and Ukraine // Forestry and Forest Melioration, 2009, t. 116, pp. 24–31.

## Сведения об авторах

**Гниненко Юрий Иванович** ✉ — канд. биол. наук, ст. науч. сотр., зав. лабораторией защиты леса от инвазивных и карантинных организмов ФБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства», gninenko-yuri@mail.ru

**Цуканов Яков Вячеславович** — аспирант ФБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства», sadness666master@gmail.com

**Галич Дмитрий Евгеньевич** — канд. биол. наук, зав. лабораторией защиты леса Сибирского филиала ФБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства», galichdim@mail.ru

**Чеплянский Иван Яковлевич** — канд. с.-х. наук, директор Южноевропейской лесной опытной станции ФБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства», donnilos@mail.ru

Поступила в редакцию 16.06.2022.

Одобрено после рецензирования 01.11.2022.

Принята к публикации 16.11.2022.

## CHAFER IS A SOMEWHAT FORGOTTEN, BUT ONCE AGAIN A REAL THREAT

Yu.I. Gninenko<sup>✉</sup>, Ya.V. Tsukanov, D.E. Galich, I.Ya. Cheplyanskiy

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

gninenko-yuri@mail.ru

The article analyzes the significance of the *Melolontha hippocastani* beetle as a dangerous forest pest in Russia. It is shown that for a long time it was the main obstacle to the successful creation of forest plantations in a number of regions of the country, in particular in the Volga region and in the south of Western Siberia. In addition, it is shown that despite this, the definition of what is the center of mass reproduction of the beetle has not been formulated. Previously, various technologies for the protection against beetles were proposed and widely used, which included both the use of chemicals and forestry measures. This led to a significant reduction in the danger from this pest, and since the end of the 20th century, the chamois has ceased to be a significant reason for forestry workers to carry out protection measures. The article shows that currently favorable conditions are again emerging for the beginning of the formation of large foci of this pest. Definitions for such concepts as «center of mass reproduction» and «center of harmfulness» of *Melolontha hippocastani* are proposed and the absence of modern drugs and technologies for protection against this pest is indicated.

**Keywords:** *Melolontha hippocastani*, centers of mass reproduction, protection measures

**Suggested citation:** Gninenko Yu.I., Tsukanov Ya.V., Galich D.E., Cheplyanskiy I.Ya. *Vostochnyy mayskiy khrushch — neskol'ko zabytaya, no vnov' real'naya ugroza* [Chafer is a somewhat forgotten, but once again a real threat]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 1, pp. 67–74.  
DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-67-74

### References

- [1] Ratzenurg J.T.C. Die Forst-Insecten jder Abbildung und Beschreibung. Erste Theil. Die Kafer. Berlin: Nicolaische Buchhandlung, 1839, 309 p.
- [2] Semenov V. *Lesookhranenie. Rukovodstvo dlya ofitserov korpusa lesnichikh* [Forest conservation. Guide for officers of the corps of foresters]. St. Petersburg: Tip. M-va gos. imushchestv, 1843, 55 p.
- [3] Rudzkiy A. *Spravochnaya kniga dlya lesnichikh. Ch. 1 Lesovodstvo* [Reference book for foresters. Part 1 Silviculture]. St. Petersburg: Type Ya. Treya, 1868, 195 p.
- [4] Baranetskiy P.V. *Lesookhranenie. Kniga dlya lesovladel'tsev, lesnichikh i slushateley uchebnykh lesnykh zavedeniy* [Forest conservation. A book for forest owners, forest rangers and students of educational forest institutions]. St. Petersburg: Type A.S. Suvorina, 1880, 312 p.
- [5] Arnol'd F.K. *Russkiy les* [Russian forest]. T. 2. Part 1. St. Petersburg: Izdanie A.F. Marksa, 1898, 705 p.
- [6] *Nastavlenie po bor'be s mayskim khrushchom v lesakh vodookhrannoy zony* [Instructions on the fight against the May beetle in the forests of the water protection zone]. Moscow: Glavnoe upravlenie lesookhrany i lesonasazhdeniy pri SNK SSSR [Main Directorate of Forest Protection and Forest Plantations under the Council of People's Commissars of the USSR], 1938, 27 p.
- [7] Peresina T.V. *Nadzor za mayskim khrushchom v Ul'yanovskoy oblasti* [Supervision of the May beetle in the Ulyanovsk region]. Bor'ba s vostochnym mayskim khrushchom: materialy k nauchno-tekhnicheskomu soveshchaniyu 17–20 avgusta 1971 g. [Fighting the Eastern May beetle: materials for the scientific and technical meeting on August 17–20, 1971]. Pushkino: VNIILM, 1971, pp. 35–40.
- [8] *Rekomendatsii po integrirovannoy bor'be s vostochnym mayskim khrushchom* [Recommendations for the integrated control of the Eastern May beetle]. Moscow: VNIILM, 1980, 28 p.
- [9] Chistyakov A.R. *Lesovodstvennye meropriyatiya pri proizvodstve lesnykh kul'tur v ochagakh mayskogo khrushchom* [Silvicultural measures in the production of forest crops in the foci of the May beetle]. Bor'ba s vostochnym mayskim khrushchom: materialy k nauchno-tekhnicheskomu soveshchaniyu 17–20 avgusta 1971 g. [Fighting the Eastern May beetle: materials for the scientific and technical meeting on August 17–20, 1971]. Pushkino: VNIILM, 1971, pp. 74–79.
- [10] Il'yuchek N.S., Rozanov G.A. *Lektsii dlya lesnoy strazhi (kratkiy kurs)* [Lectures for forest guards (short course)]. Kazan: Tatotdel soyuza s.-kh. i lesnykh rabochikh, 1927, 146 p.
- [11] Kholodkovskiy N.A. *Kurs entomologii teoreticheskoy i prikladnoy* [Course of theoretical and applied entomology]. St. Petersburg: Ed. A.F. Devriena, 1912, 508 p.
- [12] Nefed'ev A.A. *Opyt sozdaniya lesnykh kul'tur na zakhrushchevlyennykh ploshchadyakh v Mariyskoy ASSR* [Experience in creating forest plantations in the dammed areas in the Mari Autonomous Soviet Socialist Republic]. Bor'ba s vostochnym mayskim khrushchom: materialy k nauchno-tekhnicheskomu soveshchaniyu 17–20 avgusta 1971 g. [Fighting the eastern May bug: materials for the scientific and technical meeting on August 17–20, 1971]. Pushkino: VNIILM, 1971, pp. 25–20.
- [13] Pavlinov N.P. *Vostochnyy mayskiy khrushch v lesakh RSFSR i neotlozhnye meropriyatiya po bor'be s nim* [Eastern May beetle in the forests of the RSFSR and urgent measures to combat it]. Bor'ba s vostochnym mayskim khrushchom: materialy k nauchno-tekhnicheskomu soveshchaniyu 17–20 avgusta 1971 g. [Fighting Eastern May beetle: materials for the scientific and technical meeting on August 17–20, 1971]. Pushkino: VNIILM, 1971, pp. 31–34.

- [14] Vorontsov A.I. *Ekologicheskie osnovy sovremennoy sistemy meropriyatiy po bor'be s vostochnym mayskim khrushchom* [Ecological foundations of the modern system of measures to combat the eastern May beetle]. Bor'ba s vostochnym mayskim khrushchom: materialy k nauchno-tehnicheskomu soveshchaniyu 17–20 avgusta 1971 g. [Fighting the eastern May bug: materials for the scientific and technical meeting on August 17–20, 1971]. Pushkino: VNIILM, 1971, pp. 16–21.
- [15] Besschetnov V.P., Besschetnova N.N., Bychenkova T.N., Klishina L.I., Khramova O.Yu., Pechnikova N.D. *Zaseleinnost' garey na territorii kerzhenskogo zapovednika lichinkami vostochnogo mayskogo khrushcha* [Tech. Settlement of fires on the territory of the Kerzhensky Reserve by larvae of the eastern May beetle]. Trudy Gosudarstvennogo prirodnogo biosfernogo zapovednika «Kerzhenskiy»: sbornik statey [Proceedings of the State Natural Biosphere Reserve «Kerzhenskiy»: a collection of articles]. Nizhny Novgorod: Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation; State Natural Biosphere Reserve «Kerzhenskiy», 2014, pp. 142–152.
- [16] Shutyaev A.M. *Materialy k biologii i ekologii mayskogo khrushcha v usloviyakh tsentral'no-chernozemnogo zapovednika* [Materials on the biology and ecology of the May beetle in the conditions of the Central Chernozem Reserve]. Zoologicheskii zhurnal [Zoological Journal], 1958, v. 37, no. 11, pp. 1659–1667.
- [17] Niemczyk M., Neyko I. Methods of restrictions in the number of cockchafer population in the forestry of Poland and Ukraine. Forestry and Forest Melioration, 2009, t. 116, pp. 24–31.

*The study was carried out as part of the planned work on the research topic «Development of a technology for protecting pine crops from chafer and other soil pests» of the state task of the FBU VNIILM for 2021–2023.*

## Authors' information

**Gninenko Yuriy Ivanovich**  — Cand. Sci. (Biology), Senior researcher, Head of the Laboratory of Forest protection from invasive and quarantine organisms, All-Russian Research Institute for Silviculture and Forestry Mechanization, gninenko-yuri@mail.ru

**Tsukanov Yakov Vyacheslavovich** — pg. All-Russian Research Institute for Silviculture and Forestry Mechanization, sadness666master@gmail.com

**Galich Dmitriy Evgen'evich** — Cand. Sci. (Biology), Head of the Forest Protection Laboratory of the Siberian Branch of the All-Russian Research Institute for Silviculture and Forestry Mechanization, galichdim@mail.ru

**Cheplyanskiy Ivan Yakovlevich** — Cand. Sci. (Agriculture), Director of the Southern European LOS, All-Russian Research Institute for Silviculture and Forestry Mechanization, donnilos@mail.ru

Received 16.06.2022.

Approved after review 01.11.2022.

Accepted for publication 16.11.2022.

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

## НОРМАТИВНО-ПРАВОВОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ОЗЕЛЕНЕНИЯ НАБЕРЕЖНЫХ В СОВРЕМЕННОЙ РОССИИ

Т.В. Киреева<sup>✉</sup>, Е.Н. Вишнякова

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

tkireeva2005@yandex.ru

Дан анализ нормативно-правового регулирования озеленения набережных в динамике исторического развития. Рассмотрен вопрос увеличения минимально допустимого процента озеленения до существующих ранее значений (30 %) в целях поддержания зеленого каркаса города, улучшения экологии общественных зон отдыха горожан.

**Ключевые слова:** озеленение набережных, экология набережных, нормы проектирования набережных, процент озеленения набережных, правовое регулирование озеленения набережных, нормы озеленения набережных

**Ссылка для цитирования:** Киреева Т.В., Вишнякова Е.Н. Нормативно-правовое регулирование озеленения набережных в современной России // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 1. С. 75–84.  
DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-75-84

Обращение к теме озеленения набережных возникло по двум причинам: во-первых, на основании анализа выполненных в последние годы работ по реконструкции и благоустройству российских набережных при активном внедрении новых идей молодых авторов в сфере реализации федерального проекта «Формирование комфортной городской среды» [1, 2], в том числе приуроченных к юбилейным торжествам и праздничным мероприятиям в различных городах страны, результатом которых стало «изгнание» или включение в проекты незначительной доли озеленения набережных практически всех городов России с речными фасадами, во-вторых, введение нового нормативного документа СП 398.1325800.2018 «Набережные. Правила градостроительного проектирования» [3], с фиксацией ничтожно малой нормы озеленения набережных — всего 15 %. Отсутствие в проектах по озеленению деревьев (рис. 1) негативно отражается на микроклимате набережных: летом температура воздуха резко повышается в связи с наличием раскаленных покрытий дорог и тротуаров, бетона берегоукрепительных инженерных сооружений (рис. 2, 3), это снижает привлекательность набережных для отдыха [1], отрицательно влияет на экологию и «устойчивость» городской среды [4]. Экологическое состояние воздуха вблизи набережных оценивается как умеренно загрязненное, а природно-ландшафтное состояние прибрежных территорий — всего 17 % [5]. Все эти факторы ослабляют визуальную ценность береговых панорам [6],

поскольку они отличаются повсеместным преобладанием открытых пространств, утрачивают индивидуальность и нарушают своеобразие городской среды (см. рис. 1–3).

### Цель работы

Цель работы — анализ нормативно-правовых актов России по выявлению минимальной нормы озеленения при организации набережных в период 1917–2022 гг.

### Методы исследования

В работе использован принцип системного анализа, позволяющий получить более полное знание о предмете изучения путем всестороннего изучения положений каждого нормативного акта (всех его частей), а также их положение в системе законодательства страны, увидеть этапы нормативно-правового регулирования как целостный процесс, в котором все составляющие связаны между собой. В основе исследования нормативной практики по вопросам озеленения территорий в их историческом развитии лежит исторический принцип. Также используются принцип хронологии и количественный метод, который, в конечном итоге, влияет на качественные составляющие рассматриваемой проблемы. Для исследования были привлечены итоги анкетирования жителей в качестве отражения принципа выявления потребностей пользователей.

### Материалы исследования

Озеленение всегда рассматривалось как обязательный этап создания набережных еще в дореволюционной России и выполнялось за счет средств



a



б

**Рис. 1.** Нижне-Волжская набережная в Нижнем Новгороде: *a* — в районе Речного вокзала; *б* — в районе Зеленого съезда (фото автора, 01.05.2022)

**Fig. 1.** Nizhne-Volzhskaya embankment in Nizhny Novgorod: *a* — in the area of the River Station; *б* — in the area of the Zelensky cross-over (author's photo, 01.05.2022)



**Рис. 2.** Волжская набережная в Нижнем Новгороде вблизи жилого района Мещерское озеро (фото автора, май, 2021 г.)

**Fig. 2.** Volzhskaya embankment in Nizhny Novgorod near the Meshcherskoye Lake residential area (photo by the author, May 2021)



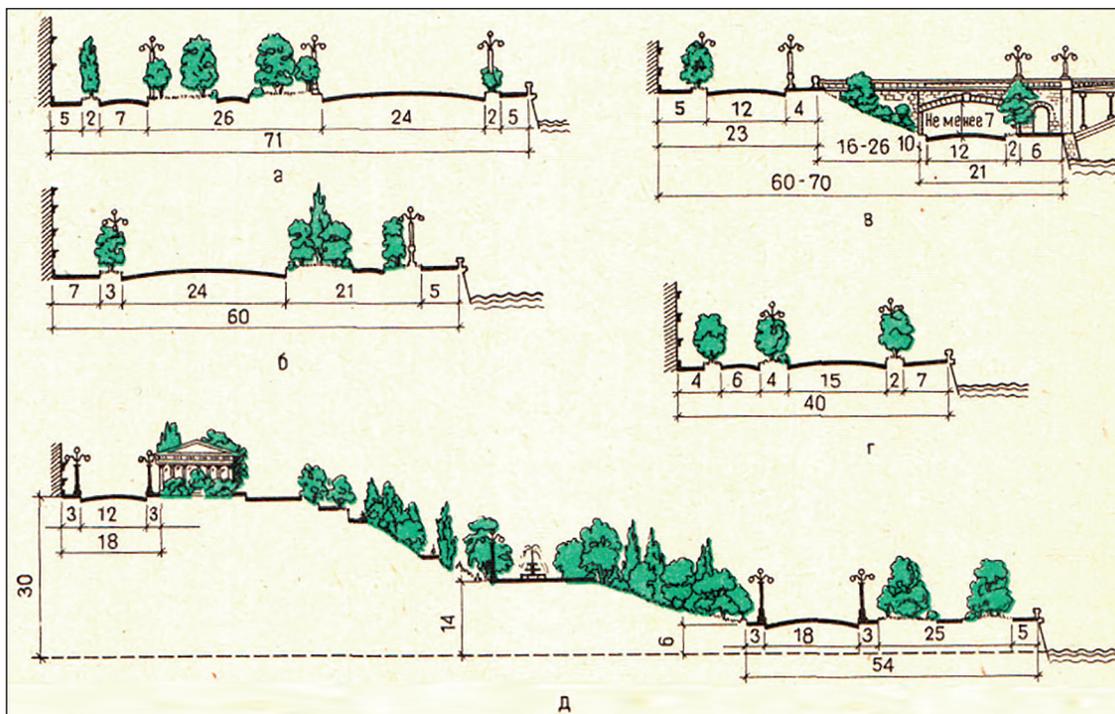
**Рис. 3.** Волжская набережная в Нижнем Новгороде около Стадиона «Нижний Новгород» (фото автора, май, 2021 г.)

**Fig. 3.** Volzhskaya embankment in Nizhny Novgorod near the Nizhny Novgorod Stadium (photo by the author, May 2021)

собственников домов, примыкающих к набережным, а в отсутствие их — за счет государственной казны [7]. После революции 1917 г. и отмены частной собственности все нормативные основы законодательства, созданные Россией в течение предшествующих 400 лет, в том числе и в сфере градостроительных отношений, были отменены.

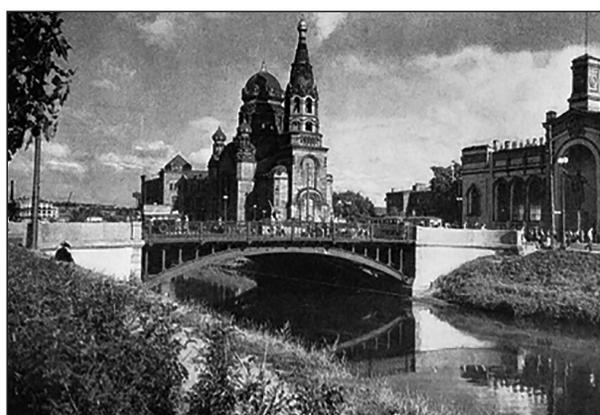
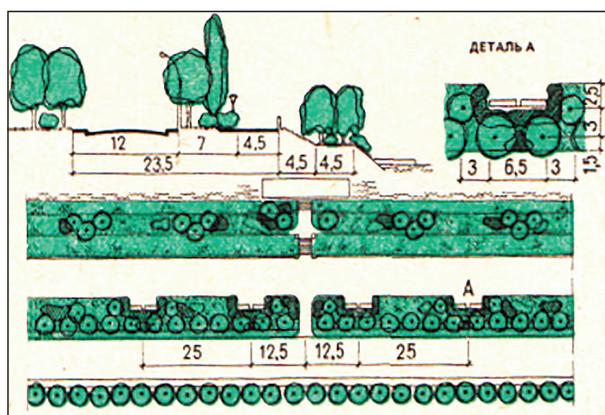
Первым нормативным документом социалистического государства в сфере градостроительства стало постановление Пленума ЦК ВКПБ(б) от 15 июня 1931 г. «О московском городском хозяйстве и развитии городского хозяйства СССР», в котором были предусмотрены действия по планомерному использованию городских земель по целевому назначению, а также указаны острые проблемы быта и городского хозяйства. Рассма-

тривались такие вопросы, как жилищное хозяйство, общественное питание и хлебопечение, энергетическое хозяйство, городской транспорт, дорожное и подземное хозяйства, водоснабжение, санитарное состояние города, однако не было уделено должное внимание вопросам озеленения, в частности, набережных [8]. Фактически в 1930-е годы собственником земли, заказчиком, проектировщиком и подрядчиком выступало одно и то же юридическое лицо — государство. Поэтому не было необходимости регулировать градостроительную деятельность на законодательном уровне. Все рекомендации и принятые научным сообществом нормативы детально разрабатывались и освещались в учебной литературе и принимались обязательными для исполнения (рис. 4) [11].



**Рис. 4.** Поперечные профили набережных: *а* — с бульваром вдоль застройки; *б* — с бульваром у реки; *в* — с проездами в разных уровнях; *г* — без бульвара с местным транспортным проездом; *д* — с проездами и аллеями на трех террасах высокого берега [11]

**Fig. 4.** Cross profiles of embankments: *a* — with a boulevard along the building; *б* — with a boulevard near the river; *в* — with passages at different levels; *г* — without a boulevard with local traffic; *д* — with driveways and alleys on three terraces of the high bank [11]

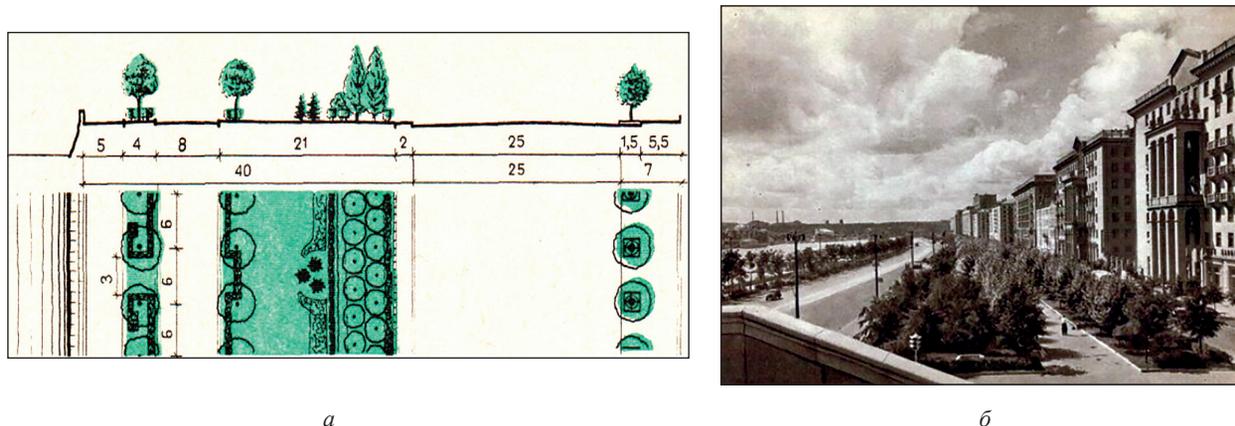


**Рис. 5.** Озеленение набережной с береговым откосом: *а* — схема озеленения [11]; *б* — Обводной канал (Ленинград, 1960) [13]

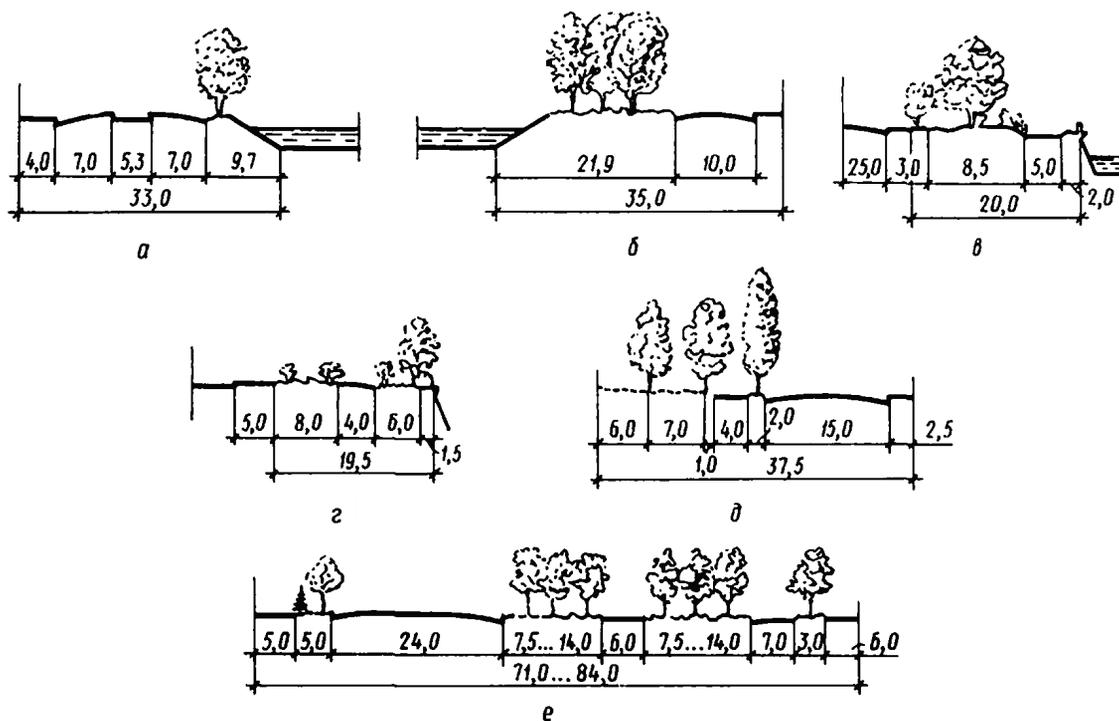
**Fig. 5.** Landscaping of the embankment with a coastal slope: *a* — landscaping scheme [11]; *б* — Obvodny Canal (Leningrad, 1960) [13]

В учебной литературе озеленение рекомендовалось проводить с сохранением имеющихся взрослых деревьев и кустарников рядами, отдельными деревьями или группами свободных очертаний так, чтобы насаждения не мешали обзору водоема, а обрамляли и подчеркивали открывающиеся перспективы водной глади, приводились схемы озеленения городских набережных [11, 12].

В приведенных вариантах озеленения имеются деревья с кроной, образующей достаточную тень для пешеходов (рис. 5, см. рис. 4). В рекомендуемом варианте озеленения набережных с бульваром вдоль застройки по схеме (см. рис. 4, *а*) не сложно сосчитать процент озеленения относительно общей площади, и он составляет 42 %. В другом варианте схемы (см. рис. 4, *б*) процент озеленения набережных с бульваром у реки



**Рис. 6.** Фрунзенская набережная (Москва): *a* — проектный профиль [11]; *б* — озеленение (автор проекта М.И. Прохорова, 1950). Фото 1960 г. [14]  
**Fig. 6.** Frunzenskaya embankment (Moscow): *a* — design profile [11]; *б* — landscaping (designed by M.I. Prokhorova, 1950). Photo 1960 [14]



**Рис. 7.** Профили озелененных набережных. Ленинград: *a, б* — набережная Обводного канала (озеленение 29,39 %, 62,57 %); *в* — Адмиралтейская набережная (57,5 %); *з* — улица Коммунаров (57,14 %); Москва: *д* — Кремлевская набережная; *е* — Фрунзенская набережная (48,8 %) [10]  
**Fig. 7.** Profiles of landscaped embankments. Leningrad: *a, б* — Obvodny Canal embankment (landscaping 29,39 %, 62,57 %); *в* — Admiralteyskaya embankment (57,5 %); *з* — Kommunarov street (57,14 %); Moscow: *д* — Kremlin embankment; *е* — Frunzenskaya embankment (48,8 %) [10]

составляет 40 % общей площади. А в варианте схемы на рис. 4, *в*, процент озеленения набережных с проездами на разных уровнях составляет 47 % общей площади. Согласно варианту схемы на рис. 4, *з*, процент озеленения набережных без бульвара с местным транспортным проездом будет составлять 25 %, в последнем варианте (см. рис. 4, *д*) процент озеленения набережных с проездами и аллеями на трех террасах высокого

берега составит более 40 %. В случае озеленения набережной с береговым откосом (см. рис. 5) процент озеленения будет не менее 49 %.

На рис. 6, 7 приведены схемы озеленения набережных Ленинграда (ныне — Санкт-Петербург) и Москвы 1960-х гг., с указанием процента озеленения относительно общей площади набережной. С начала заложения города Санкт-Петербурга и до наших дней водные просторы реки Невы



**Рис. 8.** Ленинград, 1990. Озеленение Набережной канала Грибоедова [19]  
**Fig. 8.** Leningrad, 1990. Landscaping of the Griboyedov Canal Embankment [19]



**Рис. 9.** Санкт-Петербург, 2017. Набережная канала Грибоедова, полностью лишенная озеленения [19]  
**Fig. 9.** St. Petersburg, 2017. the Griboyedov Canal Embankment, completely devoid of landscaping [19]

остаются главной природной доминантой архитектурно-планировочного решения по застройке города, где «тихие набережные каналов изящны и привлекательны» [11].

Озеленять территории набережных рекомендовано в размере не менее 40 % общей их площади, что значительно больше нынешней нормы — 15 %.

С введением в действие подзаконного нормативно-правового акта — «СНиП 2.07.01–89. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений» (далее — Акт) наступил (01.01.1990 г.) следующий важный этап. В разд. 4 «Ландшафтно-рекреационная территория» п. 4.1 этого Акта предусматривается необходимость непрерывной системы озелененных территорий и других открытых пространств, а также впервые указано: «Удельный вес озелененных территорий различного назначения в пределах застройки городов (уровень озелененности территории застройки) должен быть не менее 40 %, а в границах территории жилого района не менее 25 % (включая суммарную площадь озелененной территории микрорайона)» [15]. Однако определение понятия «набережные» и предъявляемые к их благоустройству и озеленению требования не включены в документ, оставляя в приоритете использование разработок научного сообщества.

Необходимость регулирования благоустройства территорий городов на законодательном уровне возникла лишь в период перестройки (1985–1991), с восстановлением института частной собственности на землю. В 1992 г. был принят первый с 1917 г. закон, регулирующий градостроительную деятельность — Федеральный закон от 14 июля 1992 года «Об основах градостроительства в Российской Федерации», который ставил своей целью создание основ федеральной градостроительной политики [16]. Он закрепил необходимость развития самой градостроительной отрасли, в частности, путем принятия подзаконных нормативно-правовых актов по отдельным вопросам, хотя фактически

не имел практической составляющей, поскольку самостоятельно не содержал, например, понятия «набережные» и нормативов их озеленения. В нем содержались лишь упоминания о рекреационных территориях, городах, общественных зонах как объектах градостроительной деятельности, к которым можно было бы отнести и набережные.

7 мая 1998 года был введен в действие Градостроительный кодекс Российской Федерации [17]. Закон закреплял важные положения градостроительной деятельности в целом: в нем появились нормы о градостроительном зонировании, градостроительные регламенты разрешенного использования недвижимости, были помещены правила землепользования и застройки. Принятый в 2001 году Земельный кодекс Российской Федерации [18] детально закрепил тщательно разработанные нормы правового зонирования — градостроительные регламенты стали обязательными для исполнения. Однако в указанных кодифицированных законодательных актах не уделялось внимание каким-либо нормативам благоустройства городов и набережных как отдельных элементов их планировочной структуры, они не содержали нормативов их озеленения, поэтому при решении практических вопросов проектирования набережных специалисты могли руководствоваться учебной литературой, изданной в советский период, которая содержала подобные материалы [9–12]. Правда, на практике именно в 1990-х годах деревья стали убирать с набережных, расширяя транспортные магистрали (рис. 8, 9).

Деревья, посаженные до Великой Отечественной войны (1941–1945), в годы послевоенного восстановления городов, достигли 50–60-летнего возраста и стали мешать своими кронами увеличивающемуся потоку машин. Большинство деревьев Санкт-Петербурга убрали с исторических улиц и набережных города, в том числе и по причине отсутствия конкретных норм по озеленению городских набережных.

Изменение законодательства, принятие кодифицированных законодательных актов и расширение полномочий органов местного самоуправления повлекло за собой изменение и подзаконных нормативно-правовых актов. Так, в п. 12 ст. 1 Градостроительного кодекса Российской Федерации законодатель отнес набережные к территориям общего пользования (территории, которыми беспрепятственно пользуется неограниченный круг лиц) наравне с площадями, улицами, проездами, береговыми полосами водных объектов общего пользования, скверами и бульварами.

СНиП 2.07.01–89 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений был» в 2011 г. был обновлен и зарегистрирован как СП 42.13330.2011 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений». Принятые им нормы также распространялись на проектирование новых и реконструкцию существующих городских и сельских поселений и включал в себя основные требования к планировке и застройке [20]. В этом документе впервые была указана необходимость конкретизации этих требований путем разработки региональных и местных нормативов градостроительного проектирования. В п. 4.12 гл. 4 «Концепция развития и общая организация территории городских и сельских поселений» набережные упоминаются в составе территориальных зон городских и сельских поселений как земельные участки общего пользования наравне с площадями, улицами, проездами, дорогами, скверами, бульварами, водоемами и другими объектами, предназначенными для обеспечения общественных интересов населения. К тому же определение порядка использования органами местного самоуправления земель общего пользования.

В СП 42.13330.2011 приводится минимальная суммарная площадь озелененных территорий общего пользования в рамках города или поселения (указана в метрах квадратных на человека). Исходя из отсутствия отдельного понятия «набережные», она применялась к озеленению набережных:

Для крупнейших, крупных  
и больших городов .....16  
Для средних городов .....13

В зависимости от природно-климатических условий указанные нормы могли быть уменьшены или увеличены, но не более чем на 20 %.

В 2016 г. приказом Минстроя России СП 42.13330.2011 был отменен и в силу вступил СП 42.13330.2016 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений» [21]. В гл. 3 этого документа отсутствует определение понятия «набережные», оно даже не упоминается в составе какой-либо зоны.

И только по итогам анализа гл. 9 «Зоны рекреационного назначения» и в частности п. 9.1 набережные стали относить «к зонам рекреационного назначения как земельные участки, занятые, используемые для отдыха граждан и туризма, занятий физической культурой и спортом». В п. 9.8 гл. 9 СП 42.13330.2016 указана площадь озелененных территорий общего пользования (парков, садов, скверов, бульваров), размещаемых в пределах городских и сельских поселений, — от 10 до 12 м<sup>2</sup>/чел, в зависимости от площади города, что по сути, можно было бы применить и к набережным.

В 2016 г. при масштабных работах по реконструкции города, по заказу Комитета по архитектуре и градостроительству города Москвы, в качестве методического пособия в помощь проектировщикам ГБУ «ГлавАПУ» разработан «Альбом типовых решений по комплексному благоустройству набережных Москвы-реки» [22]. Иллюстрированный альбом является наглядным пособием по озеленению отдельных зон территорий набережных, однако при этом не приводит методов расчета или каких-либо пояснений нормативного характера для широкого использования.

Очевидно, это стало поводом для выделения набережных в отдельную планировочную структуру, имеющую важнейшее значение в системе планирования города и его водно-зеленого каркаса. Впервые за всю историю России в 2018 г. был принят отдельный свод правил — СП 398.1325800.2018 «Набережные. Правила градостроительного проектирования» (далее — СП) [3], который является основным документом, регулирующим проектирование городских набережных в России в настоящее время.

В п. 3.1.9 гл. 3 «Термины, определения и сокращения» термин «набережная» СП определяется как «линейный элемент планировочной структуры населенного пункта, располагаемый вдоль берега и предназначенный для движения и отдыха пешеходов или для движения пешеходов и транспорта, представляющий собой открытую благоустроенную территорию общего пользования на поверхности берегоукрепительного сооружения, непосредственно примыкающего к водному объекту или находящегося на удалении от береговой линии» [3].

Таким образом, законодательством определено понятие «набережные» как часть планировочной структуры города, представляющую собой благоустроенную территорию поверхности берегоукрепительного сооружения. Следовательно, неблагоустроенные территории законодатель относит к обычным прибрежным территориям, примыкающим к водным объектам или естественным берегам, а не к набережным.

В гл. 4 [3] «Общие положения» СП (п. 4.1) законодатель определил, что прибрежные территории, примыкающие к водным объектам, относящиеся к ценным земельным ресурсам населенных пунктов, следует обустроить в зависимости от природно-климатических условий, местоположения, статуса населенного пункта и перспектив его развития, характеристик водоема (величины и конфигурации акватории), характеристик участка строительства (высотных отметок и характеристик грунтов). При разработке концепции использования прибрежных территорий следует обосновывать выбор участков сохранения естественных берегов и участков устройства набережных.

Кроме того, при проектировании набережных законодатель рекомендует «обеспечивать сохранение ценных ландшафтов, существующего природного рельефа, почвенного покрова, зеленых насаждений, условий существующего поверхностного водоотвода, рационально использовать вытесняемые грунты на площадке строительства» (подп. 2. п. 4.2).

В гл. 8 [3] «Требования к элементам благоустройства и озеленения набережных» СП есть п. 8.2 «Открытые и озелененные пространства», который наиболее интересен для проводимого нами исследования, поскольку в п. 2.2 гл. 2 установлен минимально допустимый процент озеленения территории проектируемых набережных — 15 % площади участка, но не относительно рекреационной нагрузки или плотности населения города в целом, что было бы правильнее с позиции привязки к местным условиям.

Пунктом 8.2.1 гл. 8 СП [3] предусмотрено, что выбор архитектурно-ландшафтного решения комплексного благоустройства открытых и озелененных пространств набережных (включая габариты участка, параметры и функциональное назначение размещаемых элементов благоустройства) следует предусматривать с учетом требований п. 8.1.3 гл. 8 СП, который обязывает учитывать при проектировании климатические, экологические и социально-культурные факторы.

Таким образом, законодатель в действующем СП [3] предусмотрел зависимость процента озеленения территории набережных от климатических, экологических и социально-культурных факторов.

Однако такая зависимость и необходимое пропорциональное соотношение площади озеленения территории набережных и остальной благоустроенной территории более детально не расшифровано и не представлены какие-либо формулы расчета необходимого процента озеленения, что является большим недостатком данных нормативов.

В п. 8.2 гл. 8 СП [3] перечислены разнообразные виды (п. 8.2.3) и приемы озеленения (п. 8.2.5). В пп. 8.2.6, 8.2.8 указаны рекомендации по учету ориентации набережной относительно сторон света, вероятно для того, чтобы обеспечить необходимую тень и инсоляцию объекта. Горожане считают набережные главным местом отдыха, которое кроме улучшения физического состояния людей, дает им психоэмоциональную разрядку, снижает стресс [1, 2, 4, 6, 8, 9–12]. Прогулки в течение всего года требуют защиты от ветра, наличия укрытий от дождя и летнего зноя [1, 2, 4], а большинство респондентов — 51 %, участвовавших в анкетировании, проведенном Институтом развития городской среды Нижегородской области [2, 23], отмечают их отсутствие как негативный факт, так же, как и отсутствие полноценного озеленения — деревьев.

## Выводы

Современная экономика, основанная рыночными отношениями, зачастую не позволяет объективно оценить озеленение благоустраиваемых городских объектов и разработать его эффективные пропорции. Заказчики не занимаются реализацией архитектурно-ландшафтных норм и не могут предусмотреть эффективность проекта в части *обеспечения нормальных (или благоприятных) экологических условий в городе* и комфорта отдыхающих горожан. Архитектурно-ландшафтные решения остаются за проектировщиками, которые могут предложить проекты, допустимые в соответствии с подп. 8.2.2 п. 8.2 гл. 8 СП 398.1325800.2018, применив порог, равный 15 % озеленения территории и более, но в действительности, не учитывающие в полной мере требования подп. 8.1.3, а также иные факторы, влияющие на людей. В большинстве случаев 15 % озелененной территории — не только недостаточный показатель для озеленения набережных и комфортного пребывания на них горожан (см. рис. 3), но и губителен для экологии города, особенно в условиях формирования его устойчивого развития.

Последние рекомендации научного сообщества относительно набережных в советское время предусматривали отведение более 40 % их площади под озеленение. Следовательно, утвержденный законодательством РФ минимально допустимый процент озеленения (15 %) для любых городских набережных относительно их общей площади как минимум почти втрое меньше процента озеленения, предлагаемого научным сообществом ранее.

Результаты деятельности научного сообщества актуальны и на сегодняшний день и широко применяются в образовательном процессе при обучении будущих специалистов в этой сфере, однако

знания не используются на практике. Заказчику проще выложить все брусчаткой, «закатать» в бетон, чтобы не учитывать климатические особенности местности, предусматривая при озеленении полив, уход, замену растений, т. е. исключить дополнительные расходы на содержание озелененной территории.

Отсутствие формулы расчета баланса соотношения площади озелененной территории набережной и ее общей площади в тексте законодательства позволяет проектировщикам организовывать пространство набережной в ущерб озеленению, что, в свою очередь, может негативно отразиться не только на главных факторах комфортного пребывания человека на прибрежных территориях, но и значительно снизить «устойчивость» городской среды.

## Список литературы

- [1] Савельев М.В. Принципы формирования городских общественных рекреационных зон и территорий набережных // Вестник Томского государственного университета, 2019. № 33. С. 173–189.
- [2] Киреева Т.В. Озеленение набережных как инструмент эффективности работы водно-зеленого каркаса города // XIII чтения памяти Т.Б. Дубяго: сб. тр. Междунар. конф. «Междисциплинарные связи ландшафтной архитектуры», СПбГЛТУ, 1–3 ноября 2021 года. Санкт-Петербург: Изд-во СПбГЛТУ, 2022. С. 110–118.
- [3] СП 398.1325800.2018. Набережные. Правила градостроительного проектирования, 30.05.2019. URL: <https://docs.cntd.ru/document/552304872> (дата обращения 15.04.2022).
- [4] Хасанов Р.Р., Киносян Н.С. Принципы архитектурно-градостроительной организации устойчивых городских набережных // Известия КГАСУ, 2018. № 2 (44). С. 38–46.
- [5] Литвинов Д.В. Градоэкологические принципы развития прибрежных зон: на примере крупных городов Поволжья: автореф. дис. ... канд. архитектуры, спец. 18.00.04. СПб., 2009. 20 с.
- [6] Нефедов В.А. Городской ландшафтный дизайн. СПб.: Любавич, 2020. 318 с.
- [7] История Санкт-Петербурга. История озеленения Санкт-Петербурга. URL: [https://www.spbmuzei.ru/ozelenenie\\_goroda.htm](https://www.spbmuzei.ru/ozelenenie_goroda.htm) (дата обращения 15.04.2022).
- [8] Постановление Пленума ЦК ВКП(б) от 15 июня 1931 г. «О московском городском хозяйстве и развитии городского хозяйства СССР». URL: <https://csdfmuseum.ru/history/935> (дата обращения 20.03.2022).
- [9] Залеская Л.С. Микулина Е.М. Ландшафтная архитектура. М.: Стройиздат, 1979. 240 с.
- [10] Лунц Л.Б. Городское зеленое строительство. М.: Стройиздат, 1974. 275 с.
- [11] Горохов В.А. Городское зеленое строительство. М.: Стройиздат, 1991. 402 с.
- [12] Горохов В.А. Зеленая природа города. М.: Архитектура-С, 2005. 592 с.
- [13]. Альбом «Мосты и набережные Ленинграда». Фото Обводный канал 1960 г. URL: <https://vecherka.spb.ru/?p=19832> (дата обращения 15.04.2022).
- [14]. Фрунзенская набережная. Фото 1960 г. URL: <https://zen.yandex.ru/media/omoskveneskuchno/frunzenskaia-naberejnaia-ot-derevenskoi-tropy-do-odnoi-iz-samyh-prestijnyh-ulic-moskvy-6229e6780bf7da1f53164347> (дата обращения 10.04.2022).
- [15] СП 42.13330.2010. СНиП 2.07.01-89. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Введ. 20.05.2011. URL: <https://docs.cntd.ru/document/5200163> (дата обращения 20.03.2022).
- [16] Закон РФ от 14.07.1992 № 3295-1 «Об основах градостроительства в Российской Федерации»: по состоянию на 30.04.2022 // Ведомости СНД РФ и ВС РФ, 13.08.1992. № 32. С. 569.
- [17] Градостроительный кодекс Российской Федерации от 07.05.1998 года № 73-ФЗ: по состоянию на 31.12.2005 // Собрание законодательства РФ. № 19. 11.05.1998. С. 113.
- [18] Земельный кодекс Российской Федерации от 25.10.2001 № 136-ФЗ: по состоянию на 31.12.2017 // Собрание законодательства РФ. 29.10.2001. № 44. С. 385.
- [19] Как Мария Темника изменила отношение петербуржцев к деревьям. URL: <https://www.sobaka.ru/city/urbanistics/110109> (дата обращения 10.04.2022).
- [20] СП 42.13330.2011. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200084712> (дата обращения 20.03.2022).
- [21] СП 42.13330.2016. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89\*. URL: <http://docs.cntd.ru/document/456054209> (дата обращения: 05.03.2022).
- [22] Альбом типовых решений по комплексному благоустройству набережных Москвы-реки. М., 2016. 564 с.
- [23] Анкета «Проблема территории набережной». URL: <https://www.sredann.org/institute> (дата обращения 20.08.21).

## Сведения об авторах

**Киреева Татьяна Валентиновна** <sup>✉</sup> — член Союза архитекторов России, канд. филос. н., доцент, профессор кафедры «Ландшафтная архитектура и садово-парковое строительство», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет», [tkireeva2005@yandex.ru](mailto:tkireeva2005@yandex.ru)

**Вишнякова Евгения Николаевна** — магистрант кафедры «Ландшафтная архитектура и садово-парковое строительство», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет», [vishnya\\_kova@mail.ru](mailto:vishnya_kova@mail.ru)

Поступила в редакцию 13.05.2022.

Одобрено после рецензирования 17.08.2022.

Принята к публикации 16.11.2022.

## EMBANKMENTS GREEN SPACES STATUTORY REGULATION IN MODERN RUSSIA

T.V. Kireeva✉, E.N. Vishnyakova

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

The issue of the insufficient size of the green area became essential due to the legal introduction the minimal norm of embankment's greening in the amount of 15 % of the total area; the analysis of the legal regulation of embankment's greening in the dynamics of historical development is given, there was proposed a hypothesis of increasing the minimum allowable percentage of embankment's greening to previous values (30 %) in order to support the «green frame» of the city, improving the ecology of public recreation areas.

**Keywords:** embankment greening, embankment design standards, embankment greening standards, percentage of embankment greening, legal regulation embankment greening

**Suggested citation:** Kireeva T.V., Vishnyakova E.N. *Normativno-pravovoe regulirovanie ozeleneniya naberezhnykh v sovremennoy Rossii* [Embankments green spaces statutory regulation in modern Russia]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 1, pp. 75–84. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-75-84

### References

- [1] Savel'ev M.V. *Printsipy formirovaniya gorodskikh obshchestvennykh rekreatsionnykh zon i territoriy naberezhnykh* [Principles of organization of urban public recreational areas and embankment territories]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Tomsk State University], 2019, no. 33, pp. 173–189.
- [2] Kireeva T.V. *Ozelenenie naberezhnykh kak instrument effektivnosti raboty vodno-zelenogo karkasa goroda* [Embankment greening as a tool for the work of the water-green frame of the city]. XIII Chteniya pamyati T.B. Dubyago: sb. tr. mezhdunar. konf. «Mezhdistsiplinarnye svyazi landshaftnoy arkhitektury» [XIII Readings in memory of T.B. Dubyago: conf. «Interdisciplinary connections of landscape architecture»], SPbGLTU, November 1–3, 2021. Sankt-Peterburg: SPbGLTU, 2022, pp. 110–118.
- [3] SP 398.1325800.2018. *Naberezhnye. Pravila gradostroitel'nogo proektirovaniya, vved. 30.05.2019* [Embankments. Rules of urban planning, en. 30.05.2019]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/552304872> (accessed 15.04.2022).
- [4] Khasanov R.R., Kinosyan N.S. *Printsipy arkhitekturno-gradostroitel'noy organizatsii ustoychivyykh gorodskikh naberezhnykh* [Principles of architectural and urban planning organization of sustainable urban embankments]. *Izvestiya KGASU* [KGASU's News], 2018, no. 2 (44), pp. 38–46.
- [5] Litvinov D.V. *Gradoekologicheskie printsipy razvitiya pribrezhnykh zon: na primere krupnykh gorodov Povolzh'ya* [Urban-ecological principles of development of coastal zones: on the example of large cities of the Volga region]. Diss. Cand. Arkhitektury, 18.00.04. St. Petersburg, 2009, 20 p.
- [6] Nefedov V.A. *Gorodskoy landshaftnyy dizayn* [Urban landscaping]. St. Petersburg: Lyubovich, 2020, 318 p.
- [7] *Istoriya Sankt-Peterburga. Istoriya ozeleneniya Sankt-Peterburga* [History of St. Petersburg. The history of landscaping in St. Petersburg]. Available at: [https://www.spbmuzei.ru/ozelenenie\\_goroda.htm](https://www.spbmuzei.ru/ozelenenie_goroda.htm) (accessed 15.04.2022).
- [8] *Postanovlenie Plenuma TsK VKPB(b) ot 15 iyunya 1931 g. «O moskovskom gorodskom khozyaystve i razvitiy gorodskogo khozyaystva SSSR»* [Resolution of the Plenum of the Central Committee of the AUCPB(b) 15.06.1931 «The economy and the development of the city Moscow USSR»]. Available at: <https://csdfmuseum.ru/history/935> (accessed 20.03.2022).
- [9] Zaleskaya L.S. Mikulina E.M. *Landshaftnaya arkhitektura* [Landscape architecture]. Moscow: Stroyizdat, 1979, 240 p.
- [10] Lunts L.B. *Gorodskoe zelenoe stroitel'stvo* [Urban green building: textbook allowance]. Moscow: Stroyizdat, 1974, 275 p.
- [11] Gorokhov V.A. *Gorodskoe zelenoe stroitel'stvo* [Urban green building]. Moscow: Stroyizdat, 1991, 402 p.
- [12] Gorokhov V.A. *Zelenaya priroda goroda* [Green nature of the city: textbook allowance]. Moscow: Arkhitektura-S, 2005, 592 p.
- [13] *Al'bom «Mosty i naberezhnye Leningrada». Foto Obvodnyy kanal 1960 g.* [Album «Bridges and embankments of Leningrad». Photo of Obvodny Canal, 1960]. Available at: <https://vecherka.spb.ru/?p=19832> (accessed 15.04.2022).
- [14] *Frunzenskaya naberezhnaya. Foto 1960 g.* [Frunzenskaya embankment. Photo 1960 year.] Available at: <https://zen.yandex.ru/media/omoskveneskuchno/frunzenskaia-naberezhnaia-ot-derevenskoi-tropy-do-odnoi-iz-samyh-prestizhnyh-ulic-moskvy-6229e6780bf7da1f53164347> (accessed 10.04.2022).
- [15] SP 42.13330.2010. SNiP 2.07.01-89. *Gradostroitel'stvo. Planirovka i zastroyka gorodskikh i sel'skikh poseleniy* [Urban planning. Planning and development of urban and rural settlements]. Introduction 20 May 2011. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/5200163> (accessed 20.03.2022).
- [16] *Zakon RF ot 14.07.1992 № 3295-1 (red. ot 19.07.1995) «Ob osnovakh gradostroitel'stva v Rossiyskoy Federatsii»* [Law of the Russian Federation of July 14, 1992 No. 3295-1 «On the fundamentals of urban planning in the Russian Federation»], 30.04.2022. *Vedomosti SND RF i VS RF* [Gazette of the Council of People's Deputies of the Russian Federation and the Armed Forces of the Russian Federation], 13.08.1992, no. 32, p. 569.
- [17] *Gradostroitel'nyy kodeks Rossiyskoy Federatsii ot 07.05.1998 № 73-FZ (red. ot 31.12.2005), 31.12.2005* [Town Planning Code of the Russian Federation of 07.05.1998 No. 73-FZ, 31.12.2005]. *Sobranie zakonodatel'stva RF* [Collection of legislation of the Russian Federation], no. 19, 11.05.1998, p. 113.
- [18] *Zemel'nyy kodeks Rossiyskoy Federatsii ot 25.10.2001 № 136-FZ (red. ot 31.12.2017)* [Land Code of the Russian Federation of October 25, 2001 No. 136-FZ, December 31, 2017]. *Sobranie zakonodatel'stva RF* [Collection of legislation of the Russian Federation], 29.10.2001, no. 44, p. 385.

- [19] *Kak Mariya Temnika izmenila otnoshenie peterburzhtsev k derev'yam* [How Maria Temnika changed the attitude of Petersburgers to trees]. Available at: <https://www.sobaka.ru/city/urbanistics/110109> (accessed 10.04.2022).
- [20] *SP 42.13330.2011. Gradostroitel'stvo. Planirovka i zastroyka gorodskikh i sel'skikh poseleniy* [SP 42.13330.2011. Urban planning. Planning and development of urban and rural settlements]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200084712> (accessed 20.03.2022).
- [21] *SP 42.13330.2016. Gradostroitel'stvo. Planirovka i zastroyka gorodskikh i sel'skikh poseleniy. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 2.07.01–89\** [SP 42.13330.2016 Urban planning. Planning and development of urban and rural settlements. Updated edition of SNIp 2.07.01–89\*]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/456054209> (accessed 05.03.2022).
- [22] *Al'bom tipovykh resheniy po kompleksnomu blagoustroystvu naberezhnykh Moskvy-reki* [Album of standard solutions for the integrated improvement of the embankments of the Moscow River]. Moscow, 2016, 564 p.
- [23] *Anketa «Problema territorii naberezhnoy»* [Questionnaire «Problem of the territory of the embankment»]. Available at: <https://www.sredann.org/institute> (accessed 20.08.2022).

## Authors' information

**Kireeva Tatiana Valentinovna**✉ — Member of the Union of Architects of the Russia, Cand. Sci. (Philosophy), Associate Professor, Professor of the Department of Landscape Architecture and Garden and Park Construction of NNGASU, [tkireeva2005@yandex.ru](mailto:tkireeva2005@yandex.ru)

**Vishnyakova Evgeniya Nikolaevna** — Master graduand of the Department of Landscape Architecture and Landscape Construction of NNGASU, [vishnya\\_kova@mail.ru](mailto:vishnya_kova@mail.ru)

Received 13.05.2022.

Approved after review 17.08.2022.

Accepted for publication 16.11.2022.

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

## ХИМИЧЕСКАЯ И БИОДЕГРАДАЦИЯ БЕЛКОВЫХ КОМПОНЕНТОВ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

**А.Н. Иванкин**

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

aivankin@mgul.ac.ru

Представлен сопоставительный анализ данных состава связанных в белке и свободных аминокислот объектов растительного и иного происхождения. Описан метод кислотного гидролиза жесткого белкового сырья, позволяющий практически полностью, с выходом более 95 %, деградировать белковую структуру при температуре 105 °С и гидромодуле 1:4 в присутствии 6М раствора соляной или серной кислоты в течение 24 ч. Приведен аминокислотный состав получаемых кислотных гидролизатов. Рассмотрена возможность химической деградации белковых структур в присутствии слабых органических кислот, в качестве которых можно использовать молочную и лимонную кислоты. Показано, что получаемый в этом случае продукт может содержать до одной трети свободных аминокислот, а также 25...35 % коротких пептидов. Охарактеризованы недостатки химической деградации белковых структур из-за возможной рацемизации высвобождаемых в ходе гидролиза белка свободных аминокислот в присутствии сильных минеральных кислот и оснований. Проанализированы возможности биохимической дефрагментации растительных белков под воздействием ферментов. Показано, что ферментативная обработка белков может быть осуществлена с эффективностью 65...85 % при низких температурах 30...50 °С в течение 4...6 ч при фермент субстратном соотношении от 1:10 до 1:100 в зависимости от активности типа энзима и его гидралазной активности. Дан краткий обзор особенностей получения белковых гидролизатов и проведено сопоставление кинетики гидролиза белков под воздействием ферментных систем, а также минеральных и органических кислот. Сделан вывод о перспективности осуществления химической и биодegradации белкового сырья растительного происхождения для получения полезных компонентов питательных систем.

**Ключевые слова:** растительный белок, биодegradация, гидролиз, кислотные гидролизаты, ферментативные гидролизаты

**Ссылка для цитирования:** 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

Растительный мир является неисчерпаемым источником множества полезных веществ, используемых человеком для пищевых, медицинских, косметических и технических целей.

В древесине, так же, как и в сельскохозяйственных растениях содержатся различные по природе химические компоненты. Состав зеленой массы, прежде всего содержание в ней хлорофилла, витаминов, белков и полисахаридов, зависит от многих факторов, в том числе от видовых особенностей растения, его возраста, климатических условий окружающей среды, состава почвы произрастания, времени суток, количества выпадаемых атмосферных осадков, сезонных колебаний температуры воздуха, освещенности и множества других факторов [1].

Динамика изменения содержания полезных компонентов в растениях существенно различается. Например, в зимний период в растениях происходит накопление питательных веществ, способствующих вегетативному росту весной.

Важнейшим компонентом являются белки. В коре обычно содержится в 2 раза больше белков, чем в ствольной части и в 2 раза меньше клетчатки. С увеличением толщины веток, например у лиственных пород, содержание клетчатки в стволе значительно уменьшается. Считается, что наибольшее количество питательных веществ содержится в листьях и хвое лесных культур, кроме того, здесь содержится значительное количество перевариваемого белка.

Растительные белки лесного происхождения до настоящего времени не нашли достойного применения, поскольку в сельскохозяйственном растениеводстве в значительном количестве производят пищевые продукты на основе таких быстрорастущих культур, как рис, пшеница, кукуруза и соя. Сегодня соевые белки представляют большой интерес из-за огромных масштабов производства. Более того, потребность в сое в свое время была удовлетворена в значительной степени благодаря созданию семян сои и продуктов на их основе методами генетической инженерии, что позволило существенно повысить урожайность и производство

Т а б л и ц а 1

## Аминокислотный состав белков различного происхождения, г/100 г белка

## Amino acid composition of proteins of various origins, g/100 g of protein

Аминокислота	Листва березы	Хвоя ели	Трава (клевер)	Зеленые водоросли (хлорелла)	Гриб опенок	Соя	Кровь свиная	Казеин в молоке	Дрожжи пивные
Незаменимые, в том числе:	37,1	41,1	51,2	42,3	45,6	36,1	46,5	43,1	34,2
валин (Вал)	4,1	5,2	5,7	4,4	6,3	4,8	7,8	5,8	5,6
изолейцин (Иле)	3,2	3,1	6,4	5,8	4,9	4,9	3,5	4,1	3,6
лейцин (Лей)	6,1	5,6	9,3	6,3	8,3	6,9	12,0	7,2	6,6
лизин (Лиз)	4,6	6,9	7,7	5,7	7,2	5,7	4,1	7,2	5,2
метионин (Мет)	5,9	5,4	3,1	2,8	3,8	1,3	2,2	2,8	0,8
тирозин (Тир)	2,7	2,5	2,8	3,9	2,5	2,9	4,6	5,3	3,2
треонин (Тре)	3,4	3,9	4,2	5,5	4,9	2,2	4,7	4,9	4,3
триптофан (Трп)	2,1	1,8	3,1	1,9	1,4	1,3	1,3	1,2	0,7
фенилаланин (Фен)	3,5	4,4	6,4	5,1	4,1	4,5	4,7	4,0	4,1
цистин (Цис)	1,5	2,3	2,5	0,9	2,2	1,6	1,6	0,5	0,1
тирозин (Тир)	2,7	2,5	2,8	3,9	2,5	2,9	4,6	5,3	3,2
Заменимые, в том числе:	48,6	47,4	34,3	43,7	49,3	55,8	49,9	49,6	54,7
аланин (Ала)	4,8	4,3	3,2	6,1	7,9	3,7	8,9	3,2	6,9
аргинин (Арг)	5,7	4,4	4,8	5,9	7,1	6,5	5,5	4,5	6,4
аспарагин (Асп)	11,8	10,9	6,4	6,8	6,7	10,9	6,0	6,1	9,5
гистидин (Гис)	2,6	3,7	2,8	3,8	3,7	2,3	2,0	2,2	3,6
глицин (Гли)	3,2	3,6	3,8	5,7	4,8	3,8	5,3	2,1	4,5
глутамин (Глу)	10,7	11,2	6,5	9,3	10,6	16,6	10,2	16,8	14,5
пролин (Про)	5,0	5,8	3,7	2,6	3,3	6,1	4,7	8,5	3,9
серин (Сер)	4,8	3,5	3,1	3,5	5,5	5,9	7,3	6,3	5,4
СУММА	85,7	88,4	85,5	86,0	94,9	91,9	96,4	92,7	88,9
Содержание белка в объекте, %	2,1	1,9	0,8	1,1	4,2	34,5	8,0	3,3	6,5

сои в целом. На сегодняшний день растительный белок из генно-модифицированной сои, а также кукурузы, является преобладающим продуктом на рынке продукции пищевой индустрии.

Растительный мир в силу своего биоразнообразия, относительно простых условий произрастания и масштабности объемов производства представляет собой глобальный интерес для получения ценных пищевых систем.

### Цель работы

Цель работы — рассмотрение возможности трансформации белковых систем под воздействием ферментов и химических реагентов, приводящих к последовательному распаду белковых макрокомплексов до пептидов и далее до свободных аминокислот.

### Растительные белки

Белки являются основными составляющими компонентами всех живых систем. Они входят в состав клеточных структур и определяют их существование [2, 3].

Количество белков различной молекулярной массы и строения в нативных растительных объектах зависит от вида растения, возраста, сезона и многих других факторов и обычно не превышает уровень 5...12 % на фоне аналогичного уровня содержания липидов — до 10 % и углеводов, количество которых колеблется в растительных объектах и может превышать 50...60 %. Содержание белка в процентах от массы свежей ткани может составлять: в семенах 10...13, стеблях 1,5...3,0, листьях 1...3, корнях 0,5...3,0, фруктах 0,2...1,5.

Количество белка обычно определяют методом сжигания, по Кьельдалю, с последующим умножением найденного содержания элементарного азота на эмпирический коэффициент — 6,1...6,25. Необходимость количественного определения белка в растительных объектах методом сжигания обусловлена нерастворимостью белковых компонентов. Растворимые белки могут определяться спектрофотометрически.

Растительные объекты как выделенные из сырья продукты обычно включают в своем составе до 30...75 % влаги. В переработанной растительной

продукции количество белка может быть значительным, например в соевых продуктах содержание белка может превышать уровень 35...55 % [4, 5].

В листе древесных пород с влажностью 62...72 % может содержаться от 2 до 5 % растительного белка, в т. ч. 2,5 % жиров и липидов, 4...7 % клетчатки, 13...21 % экстрактивных веществ, 1,5...3,2 % неорганических солей (зола). В хвое при влажности 50...58 % содержание белка составляет 2...6 %, жиров 4...5 %, клетчатки 8...15 %, экстрактивных веществ 20...23 %, золы 1,3...3,1 % [2, 4, 7].

Белки — это природные биополимеры, молекулярная структура которых представлена последовательностью аминокислот, разнотенность которых определяет их биологическое разнообразие [6–8].

В табл. 1 представлен аминокислотный состав некоторых важнейших белков с разбивкой на группы заменимых и незаменимых аминокислот, что важно для пищевых систем живых организмов. Из приведенных данных видно, что содержание индивидуальных аминокислот варьирует в составе растительных белков на уровне некоторых базовых значений. Их обычно определяют методом высокоэффективной жидкостной хроматографии белковых гидролизатов с использованием автоматических аминокислотных анализаторов [2, 6].

По данным, представленным в табл. 1, видно, что аминокислотный состав природных белков растительного, животного, рыбного или микробиологического происхождения включает в себя 20 известных базовых *L*-аминокислот и отличается только их соотношениями, что определяют филогенетическое происхождение белков. Следует отметить, что в приводимых в литературе данных о практическом аминокислотном анализе обычно приводится содержание 18 аминокислот, при этом глутамин и глутаминовая кислота фиксируются одним показателем — Глу, аналогично аспарагин и аспарагиновая кислота — как Асп [9].

Необходимо также отметить, что представленные данные (см. табл. 1) соответствуют усредненным значениям для фактически смесевых белков, каковыми они являются в матрице природного объекта.

Связанные в природные макрокомплексы белки, в составе всех природных объектов подвержены постоянным гидролитическим процессам, осуществляемым под воздействием внутренних ферментов. Вследствие этого в растительной, животной и любой другой биомассе фиксируется некоторое количество свободных аминокислот, массовая доля которых, в зависимости от объекта и условий хранения, может достигать 0,5...2,0 % масс. от общего содержания белка [4, 10, 11].

Т а б л и ц а 2

### Свободные аминокислоты в составе еловой древесины, мкг/г

Free amino acids in the composition of spruce wood, mcg/g

Аминокислота	Ствол	Корни	Листва
Ала	43	125	39
Арг	33	91	26
Асп	25	27	30
Вал	6	23	9
Гис	3	8	2
Гли	34	66	25
Глу	17	28	27
Иле	13	16	6
Лей	10	15	6
Лиз	4	14	4
Мет	1	3	1
Про	24	115	22
Сер	48	62	46
Тир	4	22	2
Тре	7	9	4
Трп	1	3	1
Фен	2	6	3
Цис	10	8	3
СУММА	285	641	256
Свободные аминокислоты, % массы образца	0,03	0,06	0,02

В табл. 2 приведены уровни свободных аминокислот, характерных для растительных объектов.

Из приведенных данных по аминокислотному составу природных белков можно заключить, что биомасса, вне зависимости от происхождения, может выступать в качестве источника полезных белков.

Нехватка белковой пищи представляет собой главную проблему жизнеобеспечения. В связи с этим, развитие научных исследований, сельскохозяйственная деятельность и пищевая индустрия всегда были направлены на включение в пищевые рационы как можно большего количества первичного и вторичного белка [12, 13].

Основная проблема потребления белка заключается в обеспечении его доступности. Недостаточно иметь просто белковое сырье. Необходимо, чтобы используемый белок был доступным для пищеварительных систем живых организмов. Например, под доступными для пищеварения млекопитающих и самого человека, понимают белки с молекулярной массой менее 10...25 кДа. Причем оптимальным должен

быть аминокислотный состав, максимально приближенный к стандарту. В качестве такого стандартного белка, благоприятного для человека, можно рассматривать казеин и другие белки женского молока, у которых соотношения заменимых и незаменимых индивидуальных аминокислот соответствуют данному, естественно благоприятному для человека продукту [14, 15].

Доступность белков для получения пищевых систем может быть повышена путем гидролиза сырья, содержащего связанные белки. В литературе имеется много публикаций, описывающих получение белковых гидролизатов из растительного и других видов сырья. Переработку белкового сырья обычно осуществляют в присутствии ферментов, органических или минеральных кислот [15–19].

Повышение биологической доступности белков предопределяет возможность их экстракции из белкового сырья и обеспечивает деградацию до малых белков — пептидов и олигопептидов, а также, в ряде случаев — тотальный гидролиз белка до аминокислот. Простая экстракция сырья, например, водно-солевыми растворами, не позволяет извлекать более 1...5 % так называемых растворимых белков из общего пула высокомолекулярных белковых компонентов. Как правило, растворимые белки имеют небольшую молекулярную массу, однако низкий технологический выход операции селективной экстракции не является приемлемым.

## Кислотные гидролизаты

Кислотные гидролизаты получают, как правило, под воздействием сильных минеральных кислот. Стандартный режим обработки, позволяющий нацело деградировать белковую структуру, обычно осуществляют в следующих условиях: температура 105 °С, время 24 ч, гидромодуль 1:4 в присутствии 6М раствора соляной или серной кислоты [15]. Такой режим обработки обеспечивает расщепление до свободных аминокислот практически любых белков с жесткой каркасной структурой, включая кератины, коллагены, флавопротеины и другие родственные белки клеточных структур. Данные условия обычно используют в аналитической биохимии при определении аминокислотного состава.

Продукты кислотной обработки белков в виде гидролизатов, состоящих на 80...90 % из свободных аминокислот, используют в медицине при парентеральном питании, когда необходимо внутривенно вводить питательную смесь для поддержания жизнедеятельности ослабленного организма [20, 21].

Кислотные гидролизаты нашли ограниченное применение из-за возможности химического разрушения в жестких условиях отдельных аминокислот, в первую очередь серина, триптофана, цистина и метионина. Цистин и метионин в частности при обработке минеральными кислотами могут разрушаться на 60...80 % [9, 14, 20].

Кислотный гидролизат, полученный из растительного кукурузного белка может содержать, г/100 г продукта: Вал 0,4; Иле 0,25; Лей 0,85; Лиз 0,3; Мет 0,15; Тир 0,3; Тре 0,26; Трп 0,05; Фен 0,34; Цис 0,12; сумма незаменимых 3,02 или 42 г/100 г исходного белка; Ала 0,52; Арг 0,35; Асп 0,48; Гис 0,21; Гли 0,1; Глу 0,5; Про 1,4; Сер 0,6; сумма заменимых 4,16 или 57,7 г/100 г белка. Содержание белка в исходном сырье — 7,2 % [22].

В первоначальных работах, посвященных химической деградации растительных и животных белков были попытки использовать щелочной гидролиз. Исследования показали, что в присутствии растворов щелочей может происходить процесс рацемизации. Все составляющие природные белки аминокислоты, являются *L*-формами. Возникновение их рацематов в виде аналогичных *D*-форм приводит к биохимическим и, по-видимому, генетическим нарушениям обмена веществ в живых организмах, поэтому гидролизаты с примесями *D*-аминокислот практически не используются [23].

В последнее время, в работах [9, 24–26], посвященных гидролитической переработке белкового сырья, стали использовать для получения кислотных гидролизатов слабые органические кислоты, как правило, пищевого назначения. В качестве таких кислот можно использовать винную, лимонную или молочную кислоты.

Условиями получения гидролизатов в этом случае обычно указывают следующие: концентрация кислоты 20 %, время обработки 4...8 ч, температура 50...80 °С, гидромодуль, определяемый как массовое соотношение белка и жидкости, составляет от 1:2 до 1:6. Отмеченные условия позволяют получать гидролизаты не только растительного происхождения, но также микробного, животного происхождения и из гидробионтов с выходом 50...85 %. Получаемые под действием органических кислот продукты могут содержать до 10...35 % пептидных фракций и до 15...25 % нерасщепленных белков [23, 25].

Так, слабокислотный гидролизат мышечного свиного белка может содержать, г/100 г белка: Вал 5,5; Иле 4,7; Лей 8,4; Лиз 10,3; Мет 3,8; Тир 3,8; Тре 5,8; Трп 1,3; Фен 4,6; Цис 1,5; сумма незаменимых 48,6; Ала 3,4; Арг 7,3; Асп 7,7; Гис 3,4; Гли 3,1; Глу 15,5; Про 3,1; Сер 2,1; сумма заменимых 46,3. Аналогичный гидролизат

из морских гидробионтов может иметь аминокислотный состав, г/100 г белка: Вал 4,0; Иле 1,7; Лей 6,6; Лиз 8,1; Мет 1,9; Тир 1,1; Тре 2,6; Фен 1,1; Цис 1,1; сумма незаменимых 28,9; Ала 6,4; Арг 2,2; Асп 11,5; Гис 1,4; Гли 11,6; Глу 20,5; Про 4,6; Сер 7,1; сумма заменимых 62,1.

### Ферментативные гидролизаты

В последние десятилетия основным способом переработки растительного белкового сырья стал метод ферментативного гидролиза. Данный способ осуществляют в присутствии растительных (папаин, фицин), микробных (различные протеазы), чаще животных (ренин, панкреатин, коллагеназы) ферментов. Особенностью метода является относительно невысокая 60...70 % степень гидролиза и практически полное отсутствие в продукте гидролитического расщепления природных белков D-форм свободных аминокислот. Продукт ферментативного расщепления может содержать одну треть свободных аминокислот, одну треть — пептидов небольшой молекулярной массы и до одной трети — непереработанных белков.

Т а б л и ц а 3

#### Белковые фракции в панкреатических гидролизатах из сырья растительного происхождения, % массы белка

Protein fractions in pancreatic hydrolysates from raw materials of plant origin, % protein mass

Молекулярная масса, кДа	Ферментативный гидролизат		
	Соя	Кукуруза	Хвойный белок
>250	1	Не обнаружено	4
70...250	Не обнаружено	5	6
50...70	9	7	12
30...50	8	15	8
20...30	7	12	7
15...20	14	10	15
10...15	18	21	27
<10	43	30	21

В табл. 3 представлены данные по молекулярно-массовому распределению (ММР) белковых фракций некоторых ферментативных гидролизатов, полученных в присутствии панкреатина. Данные ММР получены методом SDS-денатурирующего электрофореза в 18 %-м полиакриламидном геле.

Ферментативные гидролизаты, получаемые из природного сырья различного происхождения, представляют собой продукты относительно мягкого распада белковой структуры. Ферментативный гидролизат, в зависимости от условий обработки, вида исходного сырья и активности применяемого фермента, обычно представляет

собой смесь, одна треть которой (и более) может состоять из свободных аминокислот. Остальная часть продукта может включать пептиды различной молекулярной массы (см. табл. 3) и остатки нефрагментированного белка, массовая доля которого в продукте обычно не превышает нескольких процентов. Использование высокоактивных ферментов позволяет получать количество свободных аминокислот в продукте на уровне 50...85 %.

В последние годы для диетического лечебно-профилактического питания в различных пищевых рецептурах используют белки растительного происхождения, среди которых лидером является соевый белок, используемый в виде высокоочищенных изолятов с содержанием основного белка более 80 %. Медицинские исследования *in vivo* указывают на наличие гипополипидемических и гипохолестеринемических свойств ферментативных гидролизатов соевых белков, поэтому получению ферментативных гидролизатов в последнее время уделяется достаточно большое внимание. Значимой причиной этого также следует считать возможность получения ферментативных гидролизатов из растительного сырья в сравнительно мягких условиях, что легко может быть реализовано в промышленности.

Типичным к проведению процесса ферментативной переработки растительного сырья можно отметить следующий подход [27]. Исходное сырье растительного происхождения — изолят соевого белка «Supro XT 220D IP» (США) в виде 5%-го раствора. Его обрабатывают в целях получения ферментативного гидролизата ферментным препаратом панкреатином из поджелудочной железы свиньи при температуре 50 °С с массовым соотношением белка к ферменту 50:1 и 20:1 по сухим веществам. Время гидролиза 5 ч. Содержание в продукте низкомолекулярной фракции короткоцепочечных пептидов с молекулярной массой менее 1,6 кДа и свободных аминокислот при ферментализации в течение 3 ч и соотношении белка к ферменту 20:1 составило 25 и 26 % соответственно. При увеличении времени ферментализации до 5 ч соответствующие значения оказывались равными 30 и 33 %. Лиофильно высушенные гидролизаты полностью растворялись в воде их можно было использовать в качестве белкового модуля при создании специализированных пищевых продуктов для больных с алиментарно-зависимыми заболеваниями [27].

Ферментативный гидролизат, полученный из растительного белка сои, может содержать, г/100 г продукта: Вал 1,3; Иле 1,25; Лей 2,85; Лиз 3,1; Мет 0,6; Тир 1,9; Тре 2,2; Трп 0,65; Фен 2,42; Цис 0,62; сумма незаменимых 16,9 или 43 г/100 г исходного белка; Ала 1,19; Арг 2,61; Асп 2,85;

Таблица 4

**Кинетические характеристики гидролиза модельного соевого белка ферментным комплексом поджелудочной железы**

**Kinetic characteristics of hydrolysis of model soy protein by pancreatic enzyme complex**

Кинетические характеристики	Температура, °С («быстрая» стадия)			
	30	35	40	50
$V_{\max} \cdot 10^2$ , мгNH <sub>2</sub> /мл·мин <sup>-1</sup>	1,56	1,88	2,74	3,02
$K_m \cdot 10^2$ , мгNH <sub>2</sub> /мл	1,29	1,41	1,52	1,61
Свободные аминокислоты, % к массе белка	2,7	4,6	6,1	8,2

Гис 1,21; Гли 2,1; Глу 7,1; Про 2,7; Сер 1,6; сумма заменимых 21,36 или 55 г/100 г белка. Содержание белка в исходном сырье 38,5 %.

Эффективность подхода к химическому и ферментативному способу деградации белковых компонентов растительного происхождения можно оценить на основании анализа основных кинетических характеристик химического и биохимического распада белка.

В табл. 4 представлены типичные макрокинетические характеристики, установленные по начальным участкам развития процесса получения панкреатического гидролизата из соевого белка. В таблице указаны: максимальная скорость распада белка  $V_{\max}$ , оцениваемая по накоплению свободных аминных NH<sub>2</sub>-групп высвободившихся аминокислот [15, 20], константа Михаэлиса  $K_m$ , характеризующая в данном случае, эффективность фермента, а также достигнутые первоначальные уровни высвобождения аминокислот из структуры белка.

Панкреатический ферментный комплекс, получаемый из поджелудочной железы животного происхождения, является достаточно активной полиферментной системой, обладающей гидролазной, протеазной, липазной, амилазной и другими видами специфической биохимической активности. Такую достаточно универсальную ферментную систему, способную расщеплять широкий спектр субстратов, можно эффективно использовать для получения ферментализатов растительных белков. Данная ферментная система фактически моделирует *in vitro* процесс, который происходит с пищей *in vivo* в пищеварительной системе млекопитающих [28–32].

Из табл. 4 следует, что данный ферментный комплекс является достаточно активным по отношению к белковому субстрату.

В табл. 5 и 6 приведены значения кинетических констант и энергий активаций высвобождения индивидуальных кислот из соевого белка,

Таблица 5

**Макрокинетические константы, энергия активации и выход аминокислот в процессе ферментативного гидролиза растительного (соевого) белка при температуре 45 °С на первоначальной, самой быстрой стадии процесса**

**Macrokinetic constants, activation energy and amino acid yield in the process of enzymatic hydrolysis of vegetable (soy) protein at 45 °С at the initial, fastest stage of the process**

Аминокислота	$V_{\max} \cdot 10^4$ , г/100 г белка, с <sup>-1</sup>	$K_m$ , г/100 г белка	$E_a$ , кДж/моль	Выход, %
Незаменимые аминокислоты				
Вал	2,44	1,35	26,7	23,2
Иле	1,22	0,89	19,5	22,4
Лей	4,5	3,35	29,7	34,6
Лиз	4,13	3,11	32,8	32,2
Мет	1,14	0,44	22,2	19,9
Тир+Фен	3,22	2,38	43,7	77,1
Тре	0,92	0,61	18,1	26,0
Фен	2,85	2,65	29,6	35,5
Заменимые аминокислоты				
Ала	1,75	0,66	32,8	6,9
Арг	5,22	3,52	21,3	61,5
Асп	0,67	0,21	20,4	40,4
Гис	2,94	2,39	48,5	45,3
Гли	0,45	0,21	18,6	22,4
Глу	1,52	0,84	17,2	16,8
Сер	1,26	0,63	30,0	14,5

Таблица 6

**Кинетические характеристики гидролиза растительного белка сои 20%-й молочной кислотой**

**Kinetic characteristics of soybean vegetable protein hydrolysis 20 % lactic acid**

Температура процесса, °С	Эффективная константа скорости $k_{эфф} \cdot 10^3$ , мин <sup>-1</sup>
100	6,3
105	8,3
110	10,2

найденные в ходе кинетических определений в стандартных условиях [28].

В табл. 5 представлены данные выхода индивидуальных аминокислот из белковой структуры при ее ферментативной деградации. Практический выход свободных аминокислот на первоначальной стадии процесса, оцениваемой в течение первых нескольких минут, составляет от 6 до 77 %, что в определенной степени коррелирует с фактическим содержанием этих аминокислотных звеньев в исходном белке (см. табл. 1) и зависит от активности энзиматической системы.

Т а б л и ц а 7

**Эффективные значения энергии активации процесса гидролиза 20%-й молочной кислотой растительного белка после ферментативного гидролиза по отдельным аминокислотам**

**Effective values of the activation energy of the process of hydrolysis with 20 % lactic acid of vegetable protein after enzymatic hydrolysis for individual amino acids**

Аминокислота	Эффективная энергия активации $E_a$ , кДж/моль
Аланин	88,9
Аргинин	42,1
Аспарагиновая кислота	41,2
Валин	71,4
Гистидин	59,7
Глицин	20,2
Глутаминовая кислота	43,9
Изолейцин	63,2
Лейцин	61,2
Лизин	54,7
Метионин	62,1
Пролин	77,1
Тирозин	53,5
Треонин	66,1
Фенилаланин	69,4

По данным, представленным в табл. 5 и 7, можно заключить, что ферментативный гидролиз растительного белка энергетически более выгоден, чем химический. Поскольку под воздействием кислот, особенно минеральных, происходит практически тотальный распад белковой структуры, энергии, вводимой в систему, получается больше, поэтому возможен дополнительный, однако нежелательный с точки зрения качества продукта, процесс рацемизации.

Исследования практического применения химических и ферментативных гидролизатов, выполненные различными исследователями, показывают, что использование белковых гидролизатов достаточно эффективно в составе животных кормов и микробиологических сред, в пищевых системах, а также в качестве продуктов для медицины [25, 27, 28, 30]. Сырьем для таких полезных продуктов может выступать не только растительный белок, но и белки иного происхождения.

## Выводы

Краткое рассмотрение условий и результатов процессов химической и биохимической деградации растительных белков, в сопоставлении с белками иного филогенетического происхождения, показывает, что реализация природного механизма деградации белковых структур, позволяет не только осуществлять процесс переработки природного сырья с точки зрения его экологической

деградации в безопасные продукты, но и получать полезные вещества, которые можно использовать в качестве компонентов питательных систем.

## Список литературы

- [1] Кононов Г.Н. Дендрохимия — химия, нанохимия и биогеохимия компонентов клеток, тканей и органов древесных растений. М.: МГУЛ, 2016. 1111 с.
- [2] Xu L., Wang Z., Sun F., Cao Y., Zhong C., Zhang W.B. Harnessing proteins for engineered living materials // *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2021, v. 25, no. 1, p. 100896. doi.org/10.1016/j.cossms.2020.100896
- [3] Aphicho K., Narongyot Kittipanukul N., Uttamapinant C. Visualizing the complexity of proteins in living cells with genetic code expansion // *Current Opinion in Chemical Biology*, 2022, v. 66, no. 2, p. 102108. doi.org/10.1016/j.cbpa.2021.102108
- [4] Судачкова Н.Е., Милютин И.Л., Семенова Г.Л. Белки и свободные аминокислоты в древесине сосны обыкновенной, лиственницы сибирской и лиственницы Гмелина в центральной Сибири // *Химия растительного сырья*, 2000. № 1. С. 69–76.
- [5] Химический состав продуктов. URL: [http://www.intelmeal.ru/nutrition/food\\_category.php](http://www.intelmeal.ru/nutrition/food_category.php) (дата обращения 15.01.2022).
- [6] Степанов В.М. Молекулярная биология. Структура и функции белков. М.: Изд-во МГУ, 2005. 336 с.
- [7] Junprung W., Supungul P., Tassanakajon A. Structure, gene expression, and putative functions of crustacean heat shock proteins in innate immunity // *Developmental & Comparative Immunology*, 2021, v. 115, no. 1, p. 103875. doi.org/10.1016/j.dci.2020.103875
- [8] Hata H., Nishiyama M., Kitao A. Molecular dynamics simulation of proteins under high pressure: Structure, function and thermodynamics // *Biochimica et Biophysica Acta. General Subjects*, v. 1864, no. 2, p. 129395. doi.org/10.1016/j.bbagen.2019.07.004
- [9] Кузнецова Т.Г., Иванкин А.Н., Куликовский А.В. Наносенсорный анализ мясного сырья и растительных объектов. Саарбрюккен: LAP LAMBERT, 2012. 232 с.
- [10] Riga P., Benedicto L., Gil-Izquierdo A., JacintaCollado-González J., Ferreres F., Medina S. Diffuse light affects the contents of vitamin C, phenolic compounds and free amino acids in lettuce plants // *Food Chemistry*, 2019, v. 272, no. 1, pp. 227–234. doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.08.051
- [11] Matsubara Y., Ishigaki T., Koshikawa K. Changes in free amino acid concentrations in mycorrhizal strawberry plants // *Scientia Horticulturae*, v. 119, no. 4, pp. 392–396. doi.org/10.1016/j.scienta.2008.08.025
- [12] Teimouri S., Kasapis S., Dokouhaki M. Diffusional characteristics of food protein-based materials as nutraceutical delivery systems // *Trends in Food Science & Technology*, 2022, v. 122, no. 4, pp. 201–210. doi.org/10.1016/j.tifs.2022.02.025
- [13] Hadidia M., Jafarzadeh S., Forough M., Garavand F., Alizadeh S., Salehabadi A., Khaneghah A.M., MahdiJafari S. Plant protein-based food packaging films; recent advances in fabrication, characterization, and applications // *Trends in Food Science & Technology*, 2022, v. 120, no. 2, pp. 154–173. doi.org/10.1016/j.tifs.2022.01.013
- [14] Иванкин А.Н., Бердугина А.В., Неклюдов А.Д. Об экологической безопасности пищевых продуктов // *Экологические системы и приборы*, 2001. № 8. С. 39–44.
- [15] Neklyudov A.D., Ivankin A.N., Berdugina A.V. Properties and uses of protein hydrolysates (Review) // *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2000, v. 36, no. 5, pp. 452–459. doi.org/10.1007/BF02731888

- [16] Lu X., Ma R., Qiu H., Sun C., Tian Y. Mechanism of effect of endogenous/exogenous rice protein and its hydrolysates on rice starch digestibility // *International J. of Biological Macromolecules*, 2021, v. 193 A, no. 12, pp. 311–318. doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.10.140
- [17] Jain B.M., Badve M.P. A novel process for synthesis of soybean protein hydrolysates and study of its effectiveness as a biostimulant and emulsifier // *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, 2022, v. 174, no. 4, 108880. doi.org/10.1016/j.cep.2022.108880
- [18] Hea W., Guo F., Jiang Y., Liu X., Chen J. Enzymatic hydrolysates of soy protein promote the physicochemical stability of mulberry anthocyanin extracts in food processing // *Food Chemistry*, 2022, v. 386, no. 8, 132811. doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132811
- [19] Petrova I., Tolstorebrov I., Zhivlyantseva I., Eikevik T.M. Utilization of fish protein hydrolysates as peptones for microbiological culture medias // *Food Bioscience*, 2021, v. 42, no. 8, 101063. doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101063
- [20] Неклюдов А.Д. Выделение коллагенов из органов и тканей млекопитающих // *Экологические системы и приборы*, 2005. № 11. С. 27–36.
- [21] Неклюдов А.Д. Биологические свойства ароматических, гетероциклических, алифатических аминокислот // *Антибиотики и химиотерапия*, 1990. Т. 35. № 5. С. 51–58.
- [22] Saha B.C., Hayashi K. Debitting of protein hydrolyzates // *Biotechnology Advances*, 2001, v. 19, no. 5, pp. 355–370. doi.org/10.1016/S0734-9750(01)00070-2
- [23] Бабурина М.И., Горбунова Н.А., Иванкин А.Н. Ферментативная дефрагментация костного сырья для получения высококачественного белкового продукта // *Мясная индустрия*, 2021. № 12. С. 14–18. doi:10.37861/2618-8252-2021-12-35-39
- [24] Babini E., Tagliacucchi D., Martini S., Piu L.D., Andrea Gianotti A. Identification of novel antioxidant peptides obtained by enzymatic and microbial hydrolysis of vegetable proteins // *Food Chemistry*, 2017, v. 228, no. 8, pp. 186–196. doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.01.143
- [25] Иванкин А.Н., Неклюдов А.Д., Прошина О.П. Особенности коллагена в мясном сырье // *Мясная индустрия*, 2009. № 1. С. 59–63.
- [26] Ziero H.D., Ampese L.C., Sganzerla W.G., Torres-Mayanga P.C., Timko M.T. Subcritical water hydrolysis of poultry feathers for amino acids production // *The J. of Supercritical Fluids*, 2022, v. 181, no. 2, 105492. doi.org/10.1016/j.supflu.2021.105492
- [27] Зорин С.Н., Мазо В.К., Воробьева И.С., Воробьева В.М., Асафов В.А. Технология получения пептидного модуля на основе гидролизата белка сои // *Пищевая промышленность*. 2017. № 10. С. 20–23.
- [28] Штильман М.И., Подкорытова А.В., Иванкин А.Н. и др. Технология полимеров медико-биологического назначения. Полимеры природного происхождения. М.: Бинном, 2015. 328 с.
- [29] Guevara-Zambrano J.M., Verkempinck S.H., Hernandez-Ruiz L., Infantes-Garcia M.R., Hendrick M.E., Loe A.M., Grauwet T. Digestion kinetics of lipids and proteins in plant-based shakes: Impact of processing conditions and resulting structural properties // *Food Chemistry*, 2022, v. 382, no. 7, 132306. doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132306
- [30] Liew C.S., Raksasat R., Rawindran H., Kiatkittipong W., Lim J.W. Hydrolysis kinetics for solubilizing waste activated sludge at low temperature thermal treatment derived from multivariate non-linear model // *Chemosphere*, 2022, v. 292, no. 4, 133478. doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133478
- [31] Олиференко Г.Л., Иванкина А.Н., Жилин Ю.Н., Прошина О.П., Зарубина А.Н., Вострикова Н.Л., Куликовский А.В., Бабурина М.И. Кинетика кислотной трансформации природных полисахаридов древесной биомассы в моносахара для получения кормовых добавок и микробиологических сред // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2017. Т. 21. № 6. С. 61–67. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-61-67
- [32] Yu Q., Baroutian S., Xie J. Hydrothermal co-hydrolysis of corncob/sugarcane bagasse/Broussonetia papyrifera blends: Kinetics, thermodynamics and fermentation // *Bioresource Technology*, 2021, v. 342, no. 12, 125923. doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125923

## Сведения об авторе

**Иванкин Андрей Николаевич** — д-р хим. наук, профессор кафедры химии и химических технологий лесного комплекса ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал)», академик МАН ВШ, aivankin@mgul.ac.ru

Поступила в редакцию 18.04.2022.

Одобрено после рецензирования 21.09.2022.

Принята к публикации 21.11.2022.

# CHEMICAL AND BIOLOGICAL DEGRADATION OF PHYTOGENIC PROTEIN COMPONENTS

A.N. Ivankin

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

aivankin@mgul.ac.ru

Proteins in the form of biopolymer compounds are the basic components of all objects of natural origin. Hydrolysis of the protein components of plant materials is the main mechanism of biochemical degradation of biomass in nature. The article presents a comparative analysis of data on the composition of protein-bound and free amino acids of objects of plant and other origin. The purpose of the work was to consider the possibility of transformation of protein systems under the influence of enzymes and chemical reagents, leading to the sequential breakdown of protein macrocomplexes to peptides and further to free amino acids. A method of acid hydrolysis of hard protein raw materials is described, which allows almost completely, with a yield of more than 95 %, to degrade the protein structure at a temperature of 105 °C and a hydromodulus of 1:4 in the presence of a 6M solution of hydrochloric or sulfuric acids for 24 hours. the composition of the resulting acid hydrolysates. The possibility of chemical degradation of protein structures in the presence of weak organic acids such as lactic and citric acids is discussed. It has been shown that the resulting product in this case may contain up to a third of free amino acids, as well as 25...35 % of short peptides. Disadvantages of chemical degradation of protein structures due to the possible racemization of free amino acids released during protein hydrolysis in the presence of strong mineral acids and bases are discussed. The possibilities of biochemical defragmentation of plant proteins under the influence of enzymes are discussed. It has been shown that the enzymatic processing of proteins can be carried out with an efficiency of 65...85 % at low temperatures of 30...50 °C for 4...6 h with an enzyme-substrate ratio of 1:10 to 1:100, depending on the activity of the enzyme type and its hydrolase activity. The article presents a brief overview of the features of obtaining protein hydrolysates and compares the kinetics of protein hydrolysis under the influence of enzyme systems, as well as mineral and organic acids. It is concluded that the chemical and biodegradation of plant protein raw materials is promising for obtaining useful components of nutritional systems.

**Keywords:** vegetable protein, biodegradation, hydrolysis, acid hydrolysates, enzymatic hydrolysates

**Suggested citation:** Ivankin A.N. *Khimicheskaya i biodegradatsiya belkovykh komponentov rastitel'nogo proiskhozhdeniya* [Chemical and biological degradation of phytogetic protein components]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 1, pp. 85–94. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-85-94

## References

- [1] 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: MSFU, 2016, 1111 p.
- [2] Xu L., Wang Z., Sun F., Cao Y., Zhong C., Zhang W.B. Harnessing proteins for engineered living materials. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2021, v. 25, no. 1, 100896. doi.org/10.1016/j.cossms.2020.100896
- [3] Aphicho K., Narongyot Kittipanukul N., Uttamapinant C. Visualizing the complexity of proteins in living cells with genetic code expansion. *Current Opinion in Chemical Biology*, 2022, v. 66, no. 2, 102108. doi.org/10.1016/j.cbpa.2021.102108
- [4] Sudachkova N.E., Milyutina I.L., Semenova G.L. *Belki i svobodnye aminokisloty v drevesine cocny obyknovennoy, listvennitsy sibirskoy i listvennitsy Gmelina v tsestral'noy Sibiri* [Proteins and free amino acids in the wood of common pine, Siberian larch and Gmelin larch in Central Siberia]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of Plant Raw Materials], 2000, no. 1, pp. 69–76.
- [5] *Khimicheskii sostav produktov* [Chemical composition of products] Available at: [http://www.intelmeal.ru/nutrition/food\\_category.php](http://www.intelmeal.ru/nutrition/food_category.php) (accessed 15.01.2022).
- [6] Stepanov V.M. *Molekulyarnaya biologiya. Struktura i funktsii belkov* [Molecular biology. Structure and functions of proteins] Moscow: Moscow State University Publ., 2005, 336 c.
- [7] Junprung W., Supungul P., Tassanakajon A. Structure, gene expression, and putative functions of crustacean heat shock proteins in innate immunity. *Developmental & Comparative Immunology*, 2021, v. 115, no. 1, 103875. doi.org/10.1016/j.dci.2020.103875
- [8] Hata H., Nishiyama M., Kitao A. Molecular dynamics simulation of proteins under high pressure: Structure, function and thermodynamics. *Biochimica et Biophysica Acta. General Subjects*, v. 1864, no. 2, 129395. doi.org/10.1016/j.bbagen.2019.07.004
- [9] Kuznetsova T.G., Ivankin A.N., Kulikovskiy A.V. *Nanosensorny analiz myasnogo syr'ya i rastitel'nykh ob'ektov* [Nanosensor analysis of meat raw materials and plant objects]. Saarbrücken: LAP LAMBERT, 2012, 232 p.
- [10] Riga P., Benedicto L., Gil-Izquierdo A., JacintaCollado-González J., Ferreres F., Medina S. Diffuse light affects the contents of vitamin C, phenolic compounds and free amino acids in lettuce plants. *Food Chemistry*, 2019, v. 272, no. 1, pp. 227–234. doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.08.051
- [11] Matsubara Y., Ishigaki T., Koshikawa K. Changes in free amino acid concentrations in mycorrhizal strawberry plants. *Scientia Horticulturae*, v. 119, no. 4, pp. 392–396. doi.org/10.1016/j.scienta.2008.08.025
- [12] Teimouri S., Kasapis S., Dokouhaki M. Diffusional characteristics of food protein-based materials as nutraceutical delivery systems. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, v. 122, no. 4, pp. 201–210. doi.org/10.1016/j.tifs.2022.02.025

- [13] Hadidia M., Jafarzadeh S., Forough M., Garavand F., Alizadeh S., Salehabadi A., Khaneghah A.M., MahdiJafari S. Plant protein-based food packaging films; recent advances in fabrication, characterization, and applications. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, v. 120, no.2, pp. 154–173. doi.org/10.1016/j.tifs.2022.01.013
- [14] Ivankin A.N., Berdutina A.V., Neklyudov A.D. Ob jekologicheskoj bezopasnosti pishhevyyh produktov. On the ecological safety of food products. *Ecological Systems and Devices*, 2001, no. 8, pp. 39–44.
- [15] Ivankin A.N., Berdutina A.V., Neklyudov A.D. *Ob ekologicheskoy bezopasnosti pishchevykh produktov* [Properties and uses of protein hydrolysates (Review)]. *Ekologicheskie sistemy i pribory* [Applied Biochemistry and Microbiology], 2000, v. 36, no. 5, pp. 452–459. doi.org/10.1007/BF02731888
- [16] Lu X., Ma R., Qiu H., Sun C., Tian Y. Mechanism of effect of endogenous/exogenous rice protein and its hydrolysates on rice starch digestibility. *International J. of Biological Macromolecules*, 2021, v. 193 A, no. 12, pp. 311–318. doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.10.140
- [17] Jain B.M., Badve M.P. A novel process for synthesis of soybean protein hydrolysates and study of its effectiveness as a biostimulant and emulsifier. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, 2022, v. 174, no. 4, 108880. doi.org/10.1016/j.cep.2022.108880
- [18] Hea W., Guo F., Jiang Y., Liu X., Chen J. Enzymatic hydrolysates of soy protein promote the physicochemical stability of mulberry anthocyanin extracts in food processing. *Food Chemistry*, 2022, v. 386, no. 8, 132811. doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132811
- [19] Petrova I., Tolstorebrov I., Zhivlyantseva I., Eikevik T.M. Utilization of fish protein hydrolysates as peptones for microbiological culture medias. *Food Bioscience*, 2021, v. 42, no. 8, 101063. doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101063
- [20] Neklyudov A.D. *Vydelenie kollagenov iz organov i tkaney mlekopitayushchikh* [Isolation of collagens from organs and tissues of mammals]. *Ecological Systems and Devices*, 2005, no. 11, pp. 27–36.
- [21] Neklyudov A.D. *Biologicheskie svoystva aromaticheskikh, geterotsiklicheskikh, alifaticheskikh aminokislot* [Biological properties of aromatic, heterocyclic, aliphatic amino acids]. *Antibiotiki i khimioterapiya* [Antibiotics and Chemotherapy], 1990, v. 35, no. 5, pp. 51–58.
- [22] Saha B.C., Hayashi K. Debittering of protein hydrolysates. *Biotechnology Advances*, 2001, v. 19, no. 5, pp. 355–370. doi.org/10.1016/S0734-9750(01)00070-2
- [23] Baburina M.I., Gorbunova N.A., Ivankin A.N. *Fermentativnaya defragmentatsiya kostnogo syr'ya dlya polucheniya vysokokachestvennogo belkovogo produkta* [Enzymatic defragmentation of bone raw materials to obtain a high-quality protein product]. *Myasnaya industriya* [Meat Industry], 2021, no. 12, pp. 14–18. doi:10.37861/2618-8252-2021-12-35-39
- [24] Babini E., Tagliacozzi D., Martini S., Piu L.D., AndreaGianotti A. Identification of novel antioxidant peptides obtained by enzymatic and microbial hydrolysis of vegetable proteins. *Food Chemistry*, 2017, v. 228, no. 8, pp. 186–196. doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.01.143
- [25] 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.
- [26] Ziero H.D., Ampese L.C., Sganzerla W.G., Torres-Mayanga P.C., Timko M.T. Subcritical water hydrolysis of poultry feathers for amino acids production. *The J. of Supercritical Fluids*, 2022, v. 181, no. 2, 105492. doi.org/10.1016/j.supflu.2021.105492
- [27] Zorin S.N., Mazo V.K., Vorob'eva I.S., Vorob'eva V.M., Asafov V.A. *Tekhnologiya polucheniya peptidnogo modulya na osnove gidrolizata belka soi* [Technology for obtaining a peptide module based on soy protein hydrolyzate]. *Pishchevaya promyshlennost'* [Food Industry], 2017, no. 10, pp. 20–23.
- [28] Shtilman M.I., Podkorytova A.V., Ivankin A.N. et al. *Tekhnologiya polimerov mediko-biologicheskogo naznachenija. Polimery prirodnoy proishozhdenija* [Technology of polymers for medical and biological purposes. polymers of natural origin]. Moscow.: Binom Publ., 2015. 328 p.
- [29] Guevara-Zambrano J.M., Verkempinck S.H., Hernandez-Ruiz L., Infantes-Garcia M.R., Hendrick M.E., Loe A.M., Grauwet T. Digestion kinetics of lipids and proteins in plant-based shakes: Impact of processing conditions and resulting structural properties. *Food Chemistry*, 2022, v. 382, no. 7, 132306. doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132306
- [30] Liew C.S., Raksasat R., Rawindran H., Kiatkittipong W., Lim J.W. Hydrolysis kinetics for solubilizing waste activated sludge at low temperature thermal treatment derived from multivariate non-linear model. *Chemosphere*, 2022, v. 292, no. 4, 133478. doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133478
- [31] Oliferenko G.L., Ivankin A.N., Zhilin Yu.N., Proshina O.P., Zarubina A.N., Vostrikova N.L., Kulikovskiy A.V., Baburina M.I. *Kinetika kislotnoy transformatsii prirodnykh polisakharidov drevesnoy biomassy v monosakhara dlya polucheniya kormovykh dobavok i mikrobiologicheskikh sred* [Kinetics of acid transformation of natural woody biomass polysaccharides into monosaccharides for obtaining feed additives and microbiological media]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, v. 21, no. 6, pp. 61–67. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-61-67
- [32] Yu Q., Baroutian S., Xie J. Hydrothermal co-hydrolysis of corncob/sugarcane bagasse/Broussonetia papyrifera blends: Kinetics, thermodynamics and fermentation. *Bioresource Technology*, 2021, v. 342, no. 12, 125923. doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125923

## Author's information

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

Received 18.04.2022.

Approved after review 21.09.2022.

Accepted for publication 21.11.2022.

## ГИДРОФОБИЗАЦИЯ ПЛЕНОК ЦЕЛЛЮЛОЗЫ, ПОЛУЧЕННОЙ ИЗ СТЕБЛЯ БОРЩЕВИКА СОСНОВСКОГО, РАСТВОРАМИ ТЕЛОМЕРОВ ТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

С.А. Баскаков<sup>1</sup>, Ю.В. Баскакова<sup>1</sup>, Е.Н. Кабачков<sup>1,2</sup>, Г.А. Кичигина<sup>1</sup>, П.П. Куш<sup>1</sup>,  
Д.П. Кирюхин<sup>1</sup>✉, С.С. Красникова<sup>1</sup>, Э.Р. Бадамшина<sup>1</sup>, Т.А. Солдатенков<sup>3</sup>,  
В.Н. Василец<sup>4</sup>, Ф.О. Милович<sup>5</sup>, Ю.М. Шульга<sup>1,5</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии

Российской академии наук, 142432, Россия, Московская обл., Черноголовка, просп. Академика Семенова, д. 1

<sup>2</sup>ФГБУН Федеральный исследовательский центр физики твердого тела Российской академии наук, 142432, Россия,  
Московская обл., Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 2

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», 119991, г. Москва, ГСП-1,  
Ленинские горы, д. 1

<sup>4</sup>ФГБУН Филиал Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н. Семенова

Российской академии наук, 142432, Россия, Московская обл., Черноголовка, просп. Академика Семенова, д. 1/10

<sup>5</sup>ФГАУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», 119049, Москва,  
Ленинский пр-т, д. 4

kir@icp.ac.ru

Подробно описан процесс получения целлюлозы из стебля борщевика Сосновского и пленок из этой целлюлозы в связи с актуальностью хозяйственного использования этого сорного растения. Изучены элементный состав и свойства полученных образцов целлюлозы методами элементного анализа, инфракрасной спектроскопии, порошковой рентгеновской дифрактометрии, дифференциальной сканирующей калориметрии и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, что позволило определить степень ее кристалличности (65...75 %). Оценена температура стеклования (105...108 °С) образцов по результатам дифференциальной сканирующей калориметрии. Проведен сравнительный анализ характеристик полученной целлюлозы с имеющимися литературными данными. Обработаны растворами радиационно-синтезированных теломеров тетрафторэтилена пленки, полученные из целлюлозы, что дало возможность получить гидрофобный материал, краевой угол смачивания которого превышает 140°. Для гидрофобизации были использованы теломеры тетрафторэтилена, синтезированные в ацетоне, бинарном растворителе фреон 113 + аммиак и карбогале, имеющие различные концевые группы. Установлено, что краевой угол смачивания поверхности целлюлозной пленки, обработанной теломерами, зависит как от состава (концевых групп) теломера, так и от исходной концентрации тетрафторэтилена, при которой проводился синтез. Определена оптимальная концентрация тетрафторэтилена для синтеза теломеров в карбогале. Наличие фторполимерного покрытия пленки, обеспечивающего ее гидрофобность, подтверждено результатами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии.

**Ключевые слова:** целлюлоза, борщевик, гидрофобизация, ИК-спектроскопия, теломеры тетрафторэтилена, РФЭС, ДСК

**Ссылка для цитирования:** Баскаков С.А., Баскакова Ю.В., Кабачков Е.Н., Кичигина Г.А., Куш П.П., Кирюхин Д.П., Красникова С.С., Бадамшина Э.Р., Солдатенков Т.А., Василец В.Н., Милович Ф.О., Шульга Ю.М. Гидрофобизация пленок целлюлозы, полученной из стебля борщевика Сосновского, растворами теломеров тетрафторэтилена // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 1. С. 95–106.  
DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-95-106

**Б**орщевик Сосновского (далее — борщевик) — это крупное травянистое растение, вызывающее сильные и долго не заживающие ожоги на коже. В настоящее время борщевик внесен в Отраслевой классификатор сорных растений Российской Федерации под номером 5506 [1]. В северных странах Европы и Северной Америке борщевик считается инвазивным растением, с распространением которого следует бороться [2]. Из литературы известно также, что борщевик, помимо светочувствительных веществ из группы фуранокумаринов, способных вызывать серьезные

повреждения кожи, содержит полезные вещества, наличие которых позволяло ранее его классифицировать как силосное растение [3]. Многие природные материалы представляют собой композиты. Например, древесные волокна состоят из микрофибрилл целлюлозы, встроенных в аморфную матрицу из лигнина и гемицеллюлозы. В частности, в состав борщевика входят макромолекулы лигнина, которые обладают «высокой антиоксидантной активностью, сравнимой с активностью признанных антиоксидантов» [4]. Очевидно, что из борщевика можно также производить технический этанол и/или выделять целлюлозу.

Литературный поиск показал, что способы выделения целлюлозы из борщевика изучены еще недостаточно. Целлюлоза — это один из самых распространенных органических полимеров с неисчерпаемыми природными запасами, однако гидрофильная природа делает ее чувствительной к воде, что ограничивает ее долговечность [5]. Исходя из этого, гидрофобизация поверхности изделий из целлюлозы имеет большое значение. Ранее для модифицирования целлюлозосодержащих материалов нами были использованы фторсополимеры и радиационно-синтезированные теломеры тетрафторэтилена (ТФЭ), имеющие общую формулу  $R_1(CF_2CF_2)_nR_2$  ( $R_1$  и  $R_2$  — фрагменты молекул растворителей,  $n$  — длина цепи) [6].

В настоящей работе рассмотрим способ получения целлюлозы из борщевика и изучим ее свойства с помощью некоторых методов, а также приведем результаты исследования поверхности гидрофобизированной пленки, полученной из этой целлюлозы, методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). В качестве гидрофобизатора были использованы растворы теломеров ТФЭ, имеющие разную длину цепи и концевые группы, полученные в карбогале [7], бинарном растворителе фреон 113 + аммиак [8] и ацетоне [9]. В ходе работ получены результаты измерения краевого угла смачивания для капли воды на поверхности пленки.

## Цель работы

Цель работы — получение и изучение свойств целлюлозы, выделенной из высушенных стеблей борщевика.

## Материалы и методы

Стебли борщевика были собраны в районе г. Пушкино Московской обл. Стебли сушили в сушильном шкафу до достижения постоянной массы при температуре 60 °С, затем измельчали на фрагменты размером 2...5 см<sup>2</sup>. Измельченный борщевик (30 г) трехкратно промывали дистиллированной водой, помещали в двугорлую колбу объемом 2 дм<sup>3</sup>, заливали 1,5 дм<sup>3</sup> 3%-го раствора нитрида азота. Колбу термостатировали при температуре 80 °С и выдерживали при перемешивании до тех пор, пока фрагменты стебля не распадутся на отдельные пучки волокон (~24 ч). Полученный волокнистый материал желто-коричневого цвета отделяли фильтрованием и промывали для удаления свободной азотной кислоты. Полученную массу загружали в колбу и добавляли 1,5 дм<sup>3</sup> 2%-го раствора гидроксида калия, выдерживали смесь при перемешивании и температуре 60 °С еще 2 ч. После фильтрования и промывки была получена целлюлоза светло-серого оттенка. Полученную целлюлозу дополнительно

отбеливали в 1,0 дм<sup>3</sup> 3%-го раствора пероксида водорода с добавлением 10 г гидроксида калия. Реакцию проводили при температуре 50 °С в течение ~30 мин. Далее целлюлозу промывали и сушили на аппарате лиофильной сушки IShin-BioBaseFD 5512 при давлении  $6,67 \times 10^{-5}$  Па и температуре -55 °С.

Для получения пленки (бумаги) водную суспензию целлюлозы перемешивали, заливали в стеклянную форму размером 200×100 мм, сушили ~72 ч, затем высохшую пленку отделяли от формы.

Для синтеза теломеров ТФЭ были использованы следующие реактивы: тетрафторэтилен (C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>, ТФЭ) производства ОАО «ГалоПолимер Кирово-Чепецк», ацетон (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O), бинарный растворитель трифтортрихлорэтан (C<sub>2</sub>F<sub>3</sub>Cl<sub>3</sub>, фреон 113) + аммиак (NH<sub>3</sub>) и карбогал (перфтор-1,3-диметилциклогексан). Газообразный ТФЭ, содержащий 0,02 % примесей, аммиак и растворители специальной очистке не подвергались. Радиационная теломеризация проводилась в запаянных стеклянных ампулах. Образцы готовились по стандартной методике [7–9]: в стеклянную ампулу (~10 мл) помещали определенное количество растворителя или смесь растворителей, освобождали от растворенного воздуха и при температуре 77К намораживали необходимое количество ТФЭ, ампулу запаивали. В опытах с добавлением аммиака намораживали аммиак и ТФЭ. Систему перемешивали при комнатной температуре и подвергали облучению  $\gamma$ -лучами <sup>60</sup>Со на уникальной научной установке «Гамматок-100», мощность дозы облучения 3,2 Гр/с. Исходная концентрация ТФЭ в растворе ацетона составляла  $\sim 1,0 \pm 0,01$  моль/дм<sup>3</sup>, во фреоне  $\sim 0,5 \pm 0,01$  моль/дм<sup>3</sup>, в карбогале  $0,08...0,3 \pm 0,01$  моль/дм<sup>3</sup>, концентрация аммиака —  $0,11 \pm 0,01$  моль/дм<sup>3</sup>. Концентрацию полученных растворов теломеров определяли гравиметрически после удаления растворителя из реакционной смеси. Погрешность измерений не превышала  $\pm 0,5$  %.

Нанесение растворов теломеров на образцы пленки из целлюлозы проводилось методом пропитки. Обработка образцов включала в себя следующие операции: погружение образца в раствор теломера (30–40 с) и сушка при температуре 70 °С (40 мин). Пропитка образцов проводилась многократно. После каждой пропитки и сушки определялся привес образца. Количество теломера, нанесенного на образец, контролировали гравиметрически. Концентрация пропиточных растворов теломеров ТФЭ, полученных в ацетоне и смеси фреон 113 + аммиак составляла ~3,0...4,0 % (массовая доля), а в карбогале — 0,35; 1,1 и 1,8 % (массовая доля).

Элементный анализ проводили на CHNS-анализаторе Vario Micro cube (Elementar GmbH, Ханау, Германия). ИК-спектры регистрировали при комнатной температуре в диапазоне  $400 \dots 4000 \text{ см}^{-1}$  на ИК-фурье-спектрометре Perkin-Elmer Spectrum Two (Waltham, Massachusetts, США) с приставкой нарушенного полного внутреннего отражения. Контактный угол воды измеряли на приборе OCA 20 (Data Physics Instruments GmbH, Германия) при комнатной температуре. Спектры РФЭС получены с использованием электронного спектрометра Specs PHOIBOS 150 MCD (SPECS GmbH, Берлин, Германия) и рентгеновской трубки с Mg-катодом ( $h\nu = 1253,6 \text{ эВ}$ ). Вакуум в камере спектрометра не превышал  $4 \times 10^{-8} \text{ Па}$ . Спектры регистрировались в режиме постоянной энергии пропускания. Обработку данных проводили с использованием CasaXPS версии 2.3.23. Кривые дифференциальной сканирующей калориметрии регистрировали с использованием прибора Mettler-Toledo DSC 822. Образцы массой  $7 \dots 10 \text{ мг}$  помещали в алюминиевую ампулу, которая в процессе измерения находилась в атмосфере аргона при скорости потока  $0,05 \text{ дм}^3/\text{мин}$ . Тепловыделение измеряли в диапазоне температур от  $-10$  до  $+200 \text{ }^\circ\text{C}$  при минимальной скорости нагрева  $5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$ . Температуру стеклования ( $T_g$ ) с погрешностью эксперимента  $\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  рассчитывали с помощью программы Mettler-Toledo. Дифракционные исследования проводили на рентгеновском порошковом дифрактометре D2 PHASER фирмы Bruker (Германия).

## Результаты и обсуждение

Химическая формула чистой целлюлозы достаточно проста:  $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$ . Результаты проведенного элементного анализа (табл. 1) несколько отличаются от этой формулы. В исследуемом образце целлюлозы из борщевика отношение  $\text{O} : \text{C}$  больше, чем это следует из химической формулы. Это может быть связано с тем, что содержание кислорода было не измерено, а оценено по формуле (см. табл. 1). Возможно, что в составе исследуемого образца присутствуют примеси, которые не были определены в ходе проводимого анализа. Действительно, в составе целлюлозы можно отметить присутствие серы, которая перешла в исследуемый образец из исходного порошка борщевика (см. табл. 1). Как известно, сера содержится в растениях в двух основных формах — окисленной в виде неорганического сульфата и восстановленной (аминокислоты, белки). Видимо, описанная процедура выделения недостаточно эффективна для удаления серосодержащих соединений. Возможны присутствие и других примесей, которые также увеличивают оценку содержания кислорода.

Т а б л и ц а 1

### Элементный состав (%) порошка сухого борщевика, целлюлозы из борщевика и чистой целлюлозы

Elemental composition of dry hogweed powder, hogweed cellulose and pure cellulose

Образец	C	H	N	S	O
Порошок сухого борщевика	39,95	5,440	0,21	0,453	53,951
Целлюлоза из борщевика	40,80	6,185	0,05	0,254	52,711
Чистая целлюлоза	44,44	6,17	—	—	49,38

*Примечание.* Содержание кислорода было рассчитано по формуле:  $[\text{O}] = 100 - ([\text{C}]_i + [\text{H}] + [\text{N}] + [\text{S}])$ , где  $[\text{C}]_i$  — содержание  $i$ -го элемента; чистая целлюлоза рассчитана в соответствии с формулой  $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$ .

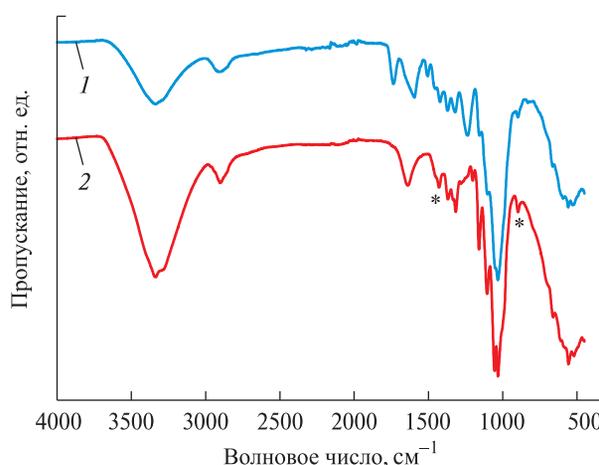


Рис. 1. ИК-спектры порошка сухого борщевика (1) и целлюлозы из борщевика (2)

Fig. 1. IR-spectra of the powder of dry hogweed stems (1) and HogC (2)

При размолу сухих стеблей борщевика получены ИК-спектры целлюлозы из борщевика и порошка (рис. 1). Видно, что в обоих спектрах присутствует широкая полоса поглощения (ПП) в диапазоне  $3690 \dots 3050 \text{ см}^{-1}$ , что обусловлено валентными колебаниями связей О-Н. Большая полуширина этой ПП указывает на сильные водородные связи у исследуемых образцов. В обоих спектрах присутствует ПП, обусловленная валентными колебаниями связей С-Н (диапазон  $2988 \dots 2812 \text{ см}^{-1}$ ).

Далее можно отметить существенные различия сравниваемых спектров. Так, в спектре 1 наблюдается ПП при частоте  $1736 \text{ см}^{-1}$  (валентные колебания связей С=О), которая отсутствует в спектре целлюлозы из борщевика. Сравним спектр полученной нами целлюлозы с литературными спектрами целлюлозы в области «отпечатков пальцев». Так, в широко цитируемой работе [10], были получены ИК-спектры для трех кристаллических (Cr-I, Cr-II, Cr-III) и одного

Таблица 2

Частоты некоторых полос поглощения ( $\text{cm}^{-1}$ ) в ИК-спектрах натурального хлопка (Cr-I), фортизана (Cr-II), хлопковой целлюлозы III (Cr-III), хлопка, размолотого в вибрационной мельнице (Am), и целлюлозы из борщевика

Frequencies of some absorption bands (in  $\text{cm}^{-1}$ ) in the IR spectra of native cotton (Cr-I), Fortisan (Cr-II), and cotton cellulose III (Cr-III), vibratory ball-milled cotton (Am), and (HogC)

Образец	Частота			
Cr-I	1429	1163	1111	897
Cr-II	1420	1156	?	893
Cr-III	1425	1163	1102	897
Am	1420	1156	?	897
Целлюлоза из борщевика	1429	1160	1105	897

аморфного (Am) образцов целлюлозы. Проведено сравнение для четырех ПП этих образцов с ПП для образца целлюлозы из борщевика, полученного нами (табл. 2). Положение двух ПП в спектре целлюлозы из борщевика при частотах 1160 и 1105  $\text{cm}^{-1}$  отличается от положений этих полос в охарактеризованных кристаллических и аморфном образцах.

Как правило, большинство целлюлозных материалов состоит из кристаллических и аморфных доменов в различных пропорциях. Взаимодействие твердых целлюлозных материалов с водой и другими реагентами сначала происходит в некристаллических доменах и/или на поверхности кристаллитов целлюлозы. Было установлено, что аморфизация целлюлозы приводит к значительному упрощению ИК-спектра за счет уменьшения интенсивности или даже исчезновения полос, характерных для кристаллических доменов. ИК-спектроскопия часто используется для оценки степени кристалличности целлюлозы [11]. Так, ПП при частоте 898...983  $\text{cm}^{-1}$  обычно позиционируется как «аморфная» ПП, увеличение ее интенсивности происходит в аморфных образцах. В качестве альтернативы аморфной ПП используют ПП при частоте 1430...1420  $\text{cm}^{-1}$  (ножничные колебания  $\text{CH}_2$ -групп). Отношение интенсивностей этих полос (отмечены звездочками на рис. 1) является показателем кристалличности изучаемых образцов целлюлозы. В случае целлюлозы из борщевика отношение интенсивностей ПП  $A_{1430}/A_{893}$  составляет  $\approx 1,85$ , или 65 %.

Другим широко используемым методом оценки степени кристалличности целлюлозы является метод рентгеновской дифракции [12–18]. Важно, что рентгеновская дифракция дает более подробные данные об особенностях кристаллической фракции целлюлозы из борщевика (рис. 2).

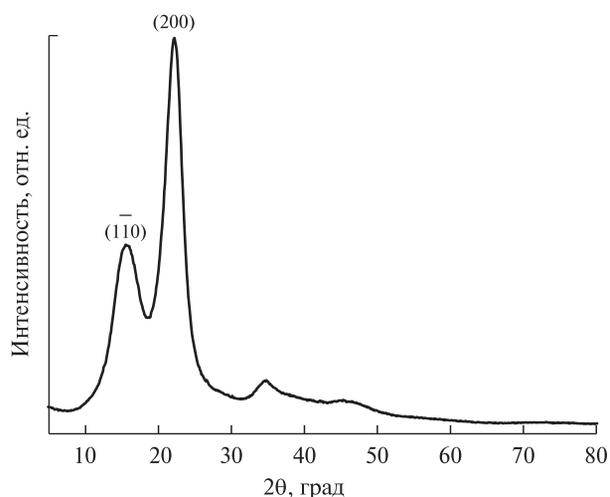


Рис. 2. Рентгенограммы целлюлозы из борщевика при температуре окружающей среды

Fig. 2. XRD patterns of HogC cellulose at ambient temperature

Отнесение пиков сделано в соответствии с работой [12]. Область когерентного рассеяния, рассчитанная по формуле Шеррера из полуширины наиболее интенсивного пика (200), равна 4 нм. Кажущуюся степень кристалличности  $C$  (%) определяли методом Сигала [18] по формуле

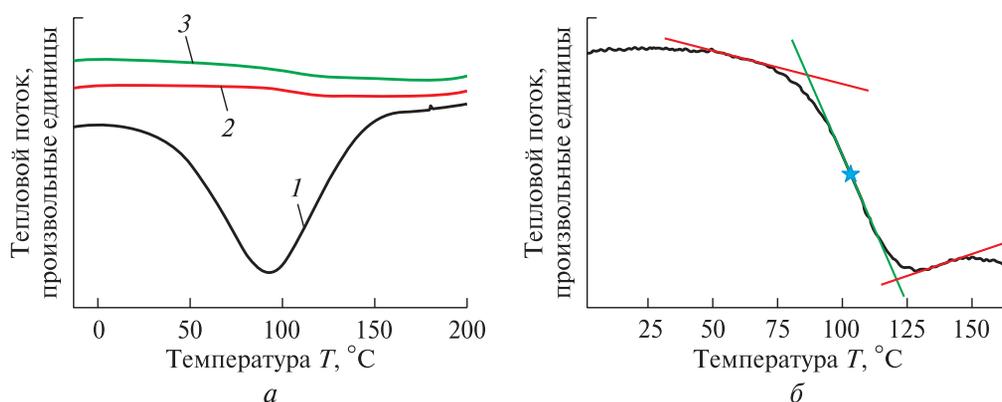
$$C = 100 (I_{200} - I_{\text{non-cr}}) / I_{200},$$

где  $I_{200}$  — интенсивность пика (200);

$I_{\text{non-cr}}$  — интенсивность дифракции некристаллического материала, которая определяется как интенсивность во впадине между пиками (10) и (200) ( $2\theta \approx 18$  град).

Для изучаемого образца кажущаяся степень кристалличности оказалась равной 75 %, что несколько превышает показатель кристалличности, определенный из ИК-спектра (65 %).

Важной характеристикой целлюлозы является температура стеклования (переход полимера из твердого стеклообразного состояния в эластичное). Температуру стеклования ( $T_g$ ) обычно определяют методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) [19–21]. Определение точного значения этой величины вызывает определенные трудности, поскольку процесс может происходить в достаточно широком (до нескольких десятков градусов) температурном интервале. Значение температуры стеклования  $T_g$  определяется как середина этой температурной области. На рис. 3 представлены ДСК-кривые для одного из исследованных образцов целлюлозы из борщевика в области предполагаемого перехода. Видно, что при первом прогоне нагрева область перехода перекрывается с интенсивным широким эндотермическим пиком, который, в соответствии с литературными данными [19–21], связан с испарением свободной воды, которая всегда присутствует в полимерах с гидрофильными группами.



**Рис. 3.** Кривые дифференциальной сканирующей калориметрии образцов целлюлозы из борщевика: *a* — прогрев образца от  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ : 1 — первый прогрев; 2 — второй прогрев; 3 — третий прогрев; *б* — определение значения температуры стеклования ( $T_g$ )

**Fig. 3.** Curves of differential scanning calorimetry of cellulose samples from hogweed: *a* — sample heating from  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ : 1 — first heating; 2 — second heating; 3 — third heating; *б* — determination of the glass transition temperature ( $T_g$ )

Обычно полагают, что сорбция воды почти полностью определяется аморфной частью целлюлозы. Следовательно, площадь эндотермического пика можно использовать для оценки относительной степени аморфизации целлюлозы в ряду образцов, которые предварительно были выдержаны длительное время при одинаковой влажности.

Исследуемый фазовый переход открывается при последующих переходах. Значения  $T_g$ , определенные при втором и третьем прогоне нагрева, составляют  $105$  и  $108\text{ }^{\circ}\text{C}$  соответственно. Литературные данные для температуры стеклования  $T_g$  в случае целлюлозы находятся в пределах от  $137\text{ }^{\circ}\text{C}$  [22] до  $220\text{ }^{\circ}\text{C}$  [23]. Конкретное значение сложным образом зависит от таких параметров, как степень кристалличности и содержание воды ( $C_{\text{H}_2\text{O}}$ ). Путем взвешивания образца до и после прогрева до  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  можно определить содержание свободной воды, испаряющейся при первом проходе, которая составляет  $1,7\%$  (массовая доля). Отметим, что помимо свободной воды, которую можно удалить путем нагрева до  $100\text{...}120\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в составе целлюлозы может быть связанная вода. Для изучаемого образца целлюлозы из борщевика степень кристалличности близка к значению  $70\%$ . В соответствии с зависимостью  $T_g = T_g(C_{\text{H}_2\text{O}})$ , представленной в работе [19], можно оценить концентрацию связанной воды. В рассматриваемом образце она составляет  $3\text{...}4\%$  (массовая доля).

Как отмечено выше, из целлюлозы из борщевика были получены пленки. Такие пленки гидрофильны, капля воды практически идеально их смачивает. Обработка поверхности пленок растворами радиационно-синтезированных теломеров ТФЭ, синтез которых подробно описан в работах [7–9], позволяет получить гидрофобные образцы (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

**Краевые углы смачивания гидрофобных пленок целлюлозы из борщевика**  
Contact water angles for HogC cellulose spathellas after hydrophobization

Номер образца	Растворитель	Концентрация $C_{\text{ТФЭ}}$ , моль/дм <sup>3</sup>	Краевые углы смачивания $\Theta$ , град
1	Карбогал	0,06	105,1
2	Карбогал	0,20	143,4
3	Карбогал	0,33	133,4
4	Ацетон	1,0	137,3
5	Фреон 113 + NH <sub>3</sub>	0,5	132,5

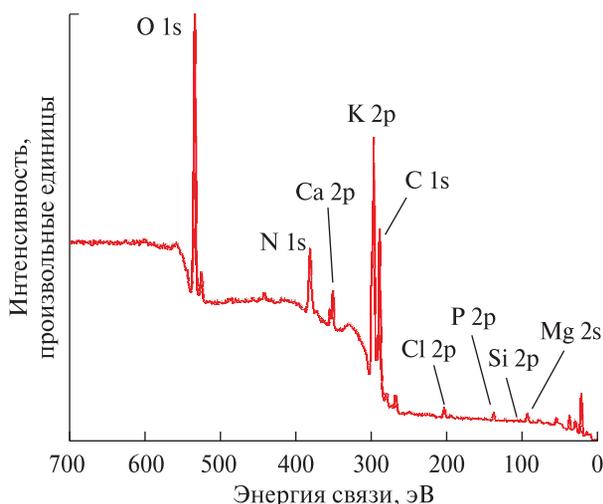
Из табл. 3 видно, что все образцы гидрофобны, а значения краевых углов смачивания ( $\Theta$ ) зависят как от растворителя, который использовали в качестве телогена при синтезе, так и от концентрации ТФЭ, при которой были получены растворы теломеров в карбогале. Это связано с тем, что от исходной концентрации ТФЭ и от химической природы растворителя зависит длина цепи получаемого теломера, от которой, в свою очередь, зависит качество получаемого гидрофобного покрытия. Ранее [24] было показано, что для получения покрытий, обладающих высокой гидрофобностью, целесообразно использовать теломеры ТФЭ с длиной цепи порядка  $15\text{...}50$  звеньев ТФЭ. Теломеры с длиной цепи  $n < 10$  и  $n > 50$  звеньев не вполне пригодны для создания гидрофобных покрытий. В рассматриваемом случае, вероятно, малый краевой угол смачивания, полученный для образца 1, обусловлен образованием при синтезе в карбогале с исходной концентрацией ТФЭ  $0,06$  моль/дм<sup>3</sup> (образец 1) теломеров с относительно малой длиной цепи.

Т а б л и ц а 4

**Состав поверхности (% ат.) пленки  
целлюлозы из борщевика до и после  
обработки теломерами**

Surface composition (% at.) of the film from HogC  
before and after telomere treatment

Пленка целлюлозы из борщевика	Содержание химических элементов				
	C	O	N	Si	F
До обработки	62,64	34,63	0,38	2,35	–
После обработки	35,03	3,75	–	1,48	59,73



**Рис 4.** Обзорный рентгеновский фотоэлектронный спектр пепла, полученного при сжигании борщевика на воздухе

**Fig. 4.** Survey XPS spectrum of ash obtained by burning hogweed in air

Кроме того, при малой концентрации использованного раствора (0,35 %, массовая доля) на поверхность образца наносится небольшое количество теломера и увеличивается количество пропиток. Обычно для пропитки использовали растворы с концентрацией 3,0...4,0 % (массовая доля). Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что при использовании растворов теломеров ТФЭ в карбогале, целесообразно проводить их синтез при концентрации  $C_{ТФЭ} \sim 0,2...0,3$  моль/дм<sup>3</sup>.

Для исследования состава поверхности пленок целлюлозы из борщевика методом РФЭС был

выбран образец с максимальным значением краевых углов смачивания ( $\Theta$ ), т. е. образец 2 (табл. 4). На поверхности необработанной пленки отношение O/C меньше такового для чистой целлюлозы, что само по себе удивительно. На наш взгляд, это происходит вследствие сорбции углеводородных загрязнений на поверхности пленки.

Следует также отметить присутствие кремния в достаточно высокой концентрации. Безусловно, определенное количество кремния присутствует в золе деревьев и растений, например, в золе рисовой соломы и шелухи содержание SiO<sub>2</sub> может достигать 85 % (массовая доля) [25]. Таких данных для борщевика в литературе не обнаружено, поэтому нами был получен обзорный спектр золы высушенных стеблей борщевика и рассчитан соответствующий элементный состав (рис. 4, табл. 5). Из представленных данных однозначно следует, что кремний входит в состав борщевика. Однако его концентрация в пепле меньше, чем на поверхности целлюлозы из борщевика.

Можно предположить, что источником загрязнения кремнием поверхности пленки из целлюлозы является стеклянная форма, в которой формировали и сушили пленку. Было замечено, что пленку из целлюлозы из борщевика труднее отделить от стекла, чем пленку из других материалов на основе целлюлозы (например, из беззольного фильтра). Съемку спектра РФЭС проводили со стороны пленки, которая контактировала со стеклянной подложкой.

Получены РФЭС-спектры высокого энергетического разрешения для линии C1s пленки из целлюлозы из борщевика до и после ее обработки теломером (рис. 5). В соответствии с литературными данными [26–29] линию C1s описывают четыре пика, обусловленные атомами углерода, не имеющими связей с кислородом (C1), имеющими одну связь с атомом кислорода (C2), имеющими две связи с атомом/атомами кислорода (C3) и имеющими три связи с атомами кислорода (C4) соответственно. Относительные положения пиков несколько различаются у разных авторов, в частности, округленные значения энергии связей для атомов C1, C2, C3 и C4, составляют: 285, 287, 288 и 289–290 эВ соответственно [29].

Т а б л и ц а 5

**Состав золы борщевика (% ат.), определенный из рентгеновского  
фотоэлектронного спектра**

Composition of the hogweed ash determined from XPS

Показатель	Содержание химических элементов									
	O	C	N	Ca	K	Cl	P	Mg	Na	Si
Концентрация, С, % ат.	29,23	40,08	0,26	2,8	21,02	1,35	1,6	2,79	0,4	0,47
Среднеквадратичное отклонение	0,266	0,294	0,132	0,105	0,168	0,075	0,144	0,259	0,2	0,142

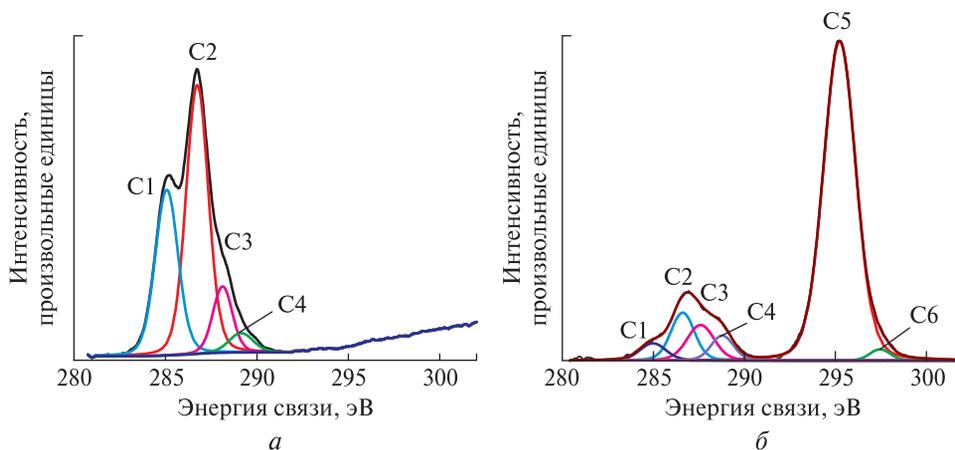


Рис. 5. Рентгеновские фотоэлектронные спектры пленки из целлюлозы из борщевика до (а) и после (б) обработки теломером

Fig. 5. XPS spectra of HogC film before (a) and after (b) telomere treatment

Т а б л и ц а 6

Относительные площади пиков (%) из спектров деконволюции C1s

Relative peak areas from deconvoluted C1s spectra

Пленка целлюлозы из борщевика	C1 (C-C/C-H)	C2 (C-OH)	C3 (O-C-O/C=O)	C4 (O-C=O)	C5 (CF <sub>2</sub> )	C6 (CF <sub>3</sub> )
До обработки	32,81	51,89	11,16	4,08	–	–
После обработки	3,24	8,24	7,08	4,14	75,64	1,66

Отметим, что, как правило, интенсивность пика C4 мала и поэтому не приводится некоторыми авторами, а также что в идеальной целлюлозе атомов углерода типа C1 быть не должно (см. химическую структуру полисахарида). Однако на РФЭС-спектрах реальных образцов целлюлозы всегда наблюдается пик, обусловленный атомами углерода этого типа. Часто для объяснения причины происхождения этого пика недостаточно предположения о слое углеводородных загрязнений на поверхности целлюлозы. Возможны другие причины, например недостаточная степень очистки от лигнина, в котором есть такие атомы углерода.

После обработки раствором теломера наиболее интенсивным пиком в спектре целлюлозы из борщевика становится пик, обусловленный атомами углерода групп CF<sub>2</sub> (см. рис. 5, табл. 6). Отметим, что при разложении возникает пик C6, который можно отнести к концевым группам. Из отношения C5/C6 можно оценить среднее число молекул ТФЭ, которые участвовали в образовании теломера [26].

И, наконец, из представленных в табл. 6 данных следует, что слой, анализируемый методом РФЭС, практически на 80 % состоит из молекул теломера, что и объясняет причину высокой степени гидрофобности поверхности пленки из целлюлозы из борщевика после указанной обработки.

## Выводы

Из сухого стебля борщевика Сосновского получена целлюлоза. Элементный состав, кристаллическая структура, термическая стабильность изучены с использованием стандартных методов, применяющихся для характеристики материалов. Степень кристалличности целлюлозы из борщевика, определенная по результатам ИК-спектроскопии и рентгеновской дифракции, составляет приблизительно 70 %, а температура стеклования по данным ДСК не превышает 105...108 °С. Проведен процесс гидрофобизации пленок из целлюлозы из борщевика, получены гидрофобные образцы с краевыми углами смачивания 140°. Для этих целей использованы теломеры ТФЭ, радиационно-синтезированные в ряде растворителей (ацетоне, карбогале, фреоне 113 + аммиак). Наличие теломеров ТФЭ на поверхности гидрофобных образцов подтверждается результатами РФЭС. Установлено, что краевые углы смачивания водой целлюлозной пленки зависят как от химической природы растворителя, так и от исходной концентрации тетрафторэтилена при синтезе теломеров.

## Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственных заданий (№№ гос. Регистрации АААА-А19-119032690060-9,

AAAA-A19-119041090087-4, АААА-А19-119061890019-5 и АААА-А18-118112290069-6) с использованием УНУ «Гамматок-100», оборудования Аналитического центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра ПХФ и МХ РАН и Федерального исследовательского центра физики твердого тела РАН в Черногловке.

## Список литературы

- [1] Лулева Н., Конечная Г., Смекалова Т., Чухина И. О статусе борщевика Сосновского на территории Российской Федерации // *Новости защиты растений*, 2018. № 3. С. 10.
- [2] Cuddington K., Sobek-Swant S., Drake J., Lee W., Brook M. Risks of giant hogweed (*Heracleum mantegazzianum*) range increase in North America // *Biol. Invasions*, 2021, pp. 1–16.
- [3] Krivosheina M.G., Ozerova N.A. Introduction of sosnowsky's hogweed as a cause of land scape transformation // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2019, v. 350, p. 012013.
- [4] Karmanov A.P., Kocheva L.S., Belyu V.A. Topological structure and antioxidant properties of macromolecules of lignin of hogweed *Heracleum sosnowskyi* Manden // *Polymer*, 2020, v. 202, p. 122756.
- [5] Samyn P., Schoukens G., Stanssens D., Vonck L., Abbeele H. Hydrophobic waterborne coating for cellulose containing hybrid organic nanoparticle pigments with vegetable oils // *Cellulose*, 2013, v. 20, pp. 2625–2646.
- [6] Иванкин А.Н., Санаев В.Г., Горбачева Г.А., Агеев А.К., Кирюхин Д.П., Кичигина Г.А., Куц П.П. Модификация свойств природных целлюлозосодержащих композиционных материалов фторополимерами и теломерами тетрафторэтилена // *ИзВУЗ Лесной журнал*, 2018. № 2. С. 122–132.
- [7] Кичигина Г.А., Куц П.П., Кирюхин Д.П., Шульга Ю.М. Радиационно-химический синтез перфторированных теломеров тетрафторэтилена // *Химия высоких энергий*, 2021. Т. 55. № 5. С. 388–392.
- [8] Куц П.П., Кичигина Г.А., Кирюхин Д.П., Баринов Д.Ю. Радиационный синтез теломеров тетрафторэтилена во фреоне 113 с функциональными гидроксильными и аминогруппами // *Химия высоких энергий*, 2018. Т. 52. № 1. С. 52–57.
- [9] Кирюхин Д.П., Кичигина Г.А., Бузник В.М. Теломеры тетрафторэтилена: радиационно-химический синтез, свойства и перспективы использования // *Высокомолекулярные соединения. Сер. А*, 2013. Т. 55. № 11. С. 1321–1332.
- [10] Nelson M.L., O'Connor R.T. Relation of certain infrared bands to cellulose crystallinity and crystal latticed type. Part I. Spectra of lattice types I, II, III and of amorphous cellulose // *J. of Applied Polymer Science*, 1964, v. 8, pp. 1311–1324.
- [11] Ciolacu D., Ciolacu F., Popa V.I. Amorphous cellulose – structure and characterization // *Cellulose Chem. Technol.*, 2011, v. 45, n. 1–2, pp. 13–21.
- [12] Christopher J. Garvey, Ian H. Parker, George P. Simon On the Interpretation of X-Ray Diffraction Powder Patterns in Terms of the Nanostructure of Cellulose I Fibres // *Macromol. Chem. Phys.*, 2005, v. 206, pp. 1568–1575.
- [13] Terinte N., Ibbett R., Schuster K.C. Overview on Native Cellulose and Microcrystalline Cellulose I Structure Studied by X-Ray Diffraction (WAXD): Comparison Between Measurement Techniques // *Lenzinger Berichte*, 2011, v. 89, pp. 118–131.
- [14] Yao W., Weng Y., Catchmark J.M. Improved cellulose X-ray diffraction analysis using Fourier series modeling // *Cellulose*, 2020, v. 27, pp. 5563–5579.
- [15] Alfred D. French Increment in evolution of cellulose crystallinity analysis // *Cellulose*, 2020, v. 27, pp. 5445–5448.
- [16] Sai Prasanna N, Mitra J. Isolation and characterization of cellulose nanocrystals from Cucumis sativus peels // *Carbohydrate Polymers*, 2020, no. 1, p. 116706.
- [17] Suciayati S.W., Manurung P., Sembiring S., Situmeang R. Comparative study of *Cladophora* sp. cellulose by using FTIR and XRD // *J. of Physics: Conference Series*, 2021, v. 1751, p. 012075.
- [18] Segal L., Creely J.J., Martin A.E.Jr., Conrad C.M. An Empirical Method for Estimating the Degree of Crystallinity of Native Cellulose using X-ray Diffractometer // *Tex. Res. J.*, 1959, v. 29, pp. 786–794.
- [19] Szczesniak L., Rachocki A., Tritt-Goc J. Glass transition temperature and thermal decomposition of cellulose powder // *Cellulose*, 2008, v.15, pp. 445–451.
- [20] Gao Z., Li N., Chen M., Yi W. Comparative study on the pyrolysis of cellulose and its model compounds // *Fuel Process Technol.*, 2019, v. 193, p. 131.
- [21] Yang H., Yan R., Chen H., Lee D.H., Zheng C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis // *Fuel*, 2007, v. 86, pp. 1781–1788.
- [22] Salmen N.L., Back E.L. The influence of water on the glass phase transition temperature of cellulose // *TAPPI*, 1977, v. 60, no. 12, pp. 137–140.
- [23] Каргин В.А., Козлов П.В., Wang Naichan. О температуре стеклования целлюлозы // *Доклады АН СССР*, 1960. Т. 130. № 2. С. 356–358.
- [24] Кичигина Г.А., Куц П.П., Кирюхин Д.П., Барелко В.В., Дорохов В.Г., Быков Л.А., Кузнецов М.В. Использование растворов радиационно-синтезированных теломеров тетрафторэтилена для модифицирования стеклоткани // *Химическая технология*, 2015, № 6. С. 326–333.
- [25] Nandiyanto A.B.D., Rahman T., Fadhilullo M.A., Abdullah A.G., Hamidah I., Mulyanti B. Synthesis of silica particles from rice straw waste using a simple extraction method // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2016, v. 128, p. 012040.
- [26] Andresen M., Johansson L.-S., Tanem B.S., Stenius P. Properties and characterization of hydrophobized micro fibrillated cellulose // *Cellulose*, 2006, v. 13, pp. 665–677.
- [27] Stenstad P., Andresen M., Tanem B.S., Stenius P. Chemical surface modifications of micro fibrillated cellulose // *Cellulose*, 2008, v. 15, pp. 35–45.
- [28] Johansson L.-S., Campbell J.M., Koljonen K., Stenius P. Evaluation of surface lignin on cellulose fibers with XPS // *Applied Surface Science*, 1999, v. 144–145, pp. 92–95.
- [29] Andresen M., Per Stenstad, T. Møretro T., Langsrud S., Syverud K., Johansson L.-S., Stenius P. Nonleaching Antimicrobial Films Prepared from Surface-Modified Micro fibrillated Cellulose // *Biomacromolecules*, 2007, v. 8, pp. 2149–2155.

## Сведения об авторах

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

**Баскакова Юлия Владимировна** — канд. хим. наук, мл. науч. сотр., ФГБУН Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук

**Кабачков Евгений Николаевич** — науч. сотр., ФГБУН Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, ФГБУН Федеральный исследовательский центр физики твердого тела Российской академии наук, evgen.ken@mail.ru

**Кичигина Галина Анатольевна** — канд. хим. наук, ст. науч. сотр., ФГБУН Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, kga@icr.ac.ru

**Куш Павел Прокофьевич** — канд. хим. наук, ст. науч. сотр., ФГБУН Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, kpp@icr.ac.ru

**Кирюхин Дмитрий Павлович** <sup>✉</sup> — д-р хим. наук, гл. науч. сотр., ФГБУН Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, kir@icr.ac.ru

**Красникова Светлана Сергеевна** — канд. хим. наук, науч. сотр., ФГБУН Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, skras27@mail.ru

**Бадамшина Эльмира Рашатовна** — д-р хим. наук, зам. директора ФИЦ ПХФ и МХ РАН, ФГБУН Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, badamsh@icr.ac.ru

**Солдатенков Тимофей Алексеевич** — студент Факультета фундаментальной физико-химической инженерии ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», mr.soldatenckow201@gmail.com

**Василец Виктор Николаевич** — д-р хим. наук, вед. науч. сотр., ФГБУН Филиал Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, vnvasilets@yandex.ru

**Милович Филипп Олегович** — канд. физ.-мат. наук, доцент, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», filippmilovich@mail.ru

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

Поступила в редакцию 16.06.2022.

Одобрено после рецензирования 28.06.2022.

Принята к публикации 05.12.2022.

# HYDROPHOBIZATION OF CELLULOSE SPATHELLAS OBTAINED FROM SOSNOWSKY HOGWEED STEM WITH SOLUTIONS OF TETRAFLUOROETHYLENE TELOMERS

S.A. Baskakov<sup>1</sup>, Y.V. Baskakova<sup>1</sup>, E.N. Kabachkov<sup>1,2</sup>, G.A. Kichigina<sup>1</sup>, P.P. Kushch<sup>1</sup>, D.P. Kiryukhin<sup>1</sup>✉, S.S. Krasnikova<sup>1</sup>, E.R. Badamshina<sup>1</sup>, T.A. Soldatenkov<sup>3</sup>, V.N. Vasilets<sup>4</sup>, F.O. Milovich<sup>5</sup>, Y.M. Shulga<sup>1,5</sup>

<sup>1</sup>Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry, Russian Academy of Sciences, 1, Academician Semenov av., 142432, Chernogolovka, Moscow reg., Russia

<sup>2</sup>Federal Research Center for Solid State Physics Russian Academy of Sciences, 142432, 2, Academician Osipyan st., Chernogolovka, Moscow reg., Russia

<sup>3</sup>M.V. Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, GSP-1, 119991, Moscow, Russia

<sup>4</sup>Branch of N.N. Semenov Federal Research Center of Chemical Physics Russian Academy of Sciences, 1/10, Academician Semenov av., 142432, Chernogolovka, Moscow reg., Russia

<sup>5</sup>National University of Science and Technology MISIS, 4, Leninsky av., 119049, Moscow, Russia

kir@icp.ac.ru

The process of obtaining cellulose from the Sosnowsky hogweed stem and spathellas from this cellulose is described in detail. The task is relevant from the point of view of the use of this weed. The elemental composition and properties of the obtained cellulose samples were studied by elemental analysis, infrared (IR) spectroscopy, X-ray powder diffractometry, differential scanning calorimetry (DSC), and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). The study of IR spectra and X-ray patterns of cellulose made it possible to determine the degree of its crystallinity (65...75 %). The glass transition temperature (105...108 °C) of the samples was estimated from the results of DSC. A comparative analysis of the characteristics of the obtained cellulose with the available literature data was carried out. The treatment of spathellas obtained from cellulose with solutions of radiation-synthesized tetrafluoroethylene (TFE) telomers made it possible to obtain a hydrophobic material with a contact angle exceeding 140°. For hydrophobization, we used TFE telomers synthesized in acetone, the binary solvent Freon 113 + ammonia, and Flutec PP3, which have different terminal groups. It has been established that the interfacial angle of the surface of a cellulose spathella treated with telomers depends both on the composition (end groups) of the telomer and on the initial concentration of TFE at which the synthesis was carried out. The optimal concentration of TFE for the synthesis of telomers in Flutec PP3 has been determined. The presence of a fluoropolymer coating of the spathella, which ensures its hydrophobicity, was confirmed by XPS results.

**Keywords:** cellulose, hogweed, hydrophobization, IR-spectroscopy, telomers of tetrafluoroethylene, XPS, DSC

**Suggested citation:** Baskakov S.A., Baskakova Y.V., Kabachkov E.N., Kichigina G.A., Kushch P.P., Kiryukhin D.P., Krasnikova S.S., Badamshina E.R., Soldatenkov T.A., Vasilets V.N., Milovich F.O., Shulga Y.M. *Gidrofobizatsiya plenok tsellyulozy, poluchennykh iz steblya borshchevika Sosnovskogo, rastvorami telomerov tetrafluoretilena* [Hydrophobization of cellulose spathellas obtained from Sosnowsky hogweed stem with solutions of tetrafluoroethylene telomers]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 1, pp. 95–106. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-95-106

## References

- [1] Luneva N., Konechnaya G., Smekalova T., Chukhina I. *O statuse borshchevika Sosnovskogo na territorii Rossiyskoy Federatsii* [On the status of Sosnowsky's hogweed on the territory of the Russian Federation]. *Novosti zashchity rasteniy* [Plant Protection News], 2018, no. 3, p. 10.
- [2] Cuddington K., Sobek-Swant S., Drake J., Lee W., Brook M. Risks of giant hogweed (*Heracleum mantegazzianum*) range increase in North America. *Biol. Invasions*, 2021, pp. 1–16.
- [3] Krivosheina M.G., Ozerova N.A. Introduction of sosnowsky's hogweed as a cause of land scape transformation. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2019, v. 350, p. 012013.
- [4] Karmanov A.P., Kocheva L.S., Belyy V.A. Topological structure and antioxidant properties of macromolecules of lignin of hogweed *Heracleum sosnowskyi* Manden. *Polymer*, 2020, v. 202, p. 122756.
- [5] Samyn P., Schoukens G., Stanssens D., Vonck L., Abbeele H. Hydrophobic waterborne coating for cellulose containing hybrid organic nanoparticle pigments with vegetable oils. *Cellulose*, 2013, v. 20, pp. 2625–2646.
- [6] Ivankin A.N., Sanaev V.G., Gorbacheva G.A., Ageev A.K., Kiryukhin D.P., Kichigina G.A., Kushch P.P. *Modifikatsiya svoystv prirodnikh tsellyulozosoderzhashchikh kompozitsionnykh materialov storsopolimerami i telomerami tetrafluoretilena* [Modification of the properties of natural cellulose-containing composite materials with fluorocopolymers and tetrafluoroethylene telomers]. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*, 2018, no. 2, pp. 122–132.
- [7] Kichigina G.A., Kushch P.P., Kiryukhin D.P., Shul'ga Yu.M. *Radiatsionno-khimicheskiy sintez perfluorirovannykh telomerov tetrafluoretilena* [Radiation-chemical synthesis of perfluorinated tetrafluoroethylene telomers]. *Khimiya vysokikh energiy* [High Energy Chemistry], 2021, v. 55, no. 5, pp. 388–392.
- [8] Kushch P.P., Kichigina G.A., Kiryukhin D.P., Barinov D.Yu. *Radiatsionnyy sintez telomerov tetrafluoretilena vo freone 113 s funktsional'nymi gidroksil'nymi i aminogruppami* [Radiation synthesis of tetrafluoroethylene telomers in Freon 113 with functional hydroxyl and amino groups]. *Khimiya vysokikh energiy* [High Energy Chemistry], 2018, v. 52, no. 1, pp. 52–57.

- [9] Kiryukhin D.P., Kichigina G.A., Buznik V.M. *Telomery tetrafluoretilena: radiatsionno-khimicheskiy sintez, svoystva i perspektivy ispol'zovaniya* [Telomers of tetrafluoroethylene: radiation-chemical synthesis, properties and prospects of use]. *Vysokomolekulyarnye soedineniya, seriya A* [High-molecular compounds, series A], 2013, v. 55, no. 11, pp. 1321–1332.
- [10] Nelson M.L., O'Connor R.T. Relation of certain infrared bands to cellulose crystallinity and crystal latticed type. Part I. Spectra of lattice types I, II, III and of amorphous cellulose. *J. of Applied Polymer Science*, 1964, v. 8, pp. 1311–1324.
- [11] Ciolacu D., Ciolacu F., Popa V.I. Amorphous cellulose – structure and characterization. *Cellulose Chem. Technol.*, 2011, v. 45, n. 1–2, pp. 13–21.
- [12] Christopher J. Garvey, Ian H. Parker, George P. Simon On the Interpretation of X-Ray Diffraction Powder Patterns in Terms of the Nanostructure of Cellulose I Fibres. *Macromol. Chem. Phys.*, 2005, v. 206, pp. 1568–1575.
- [13] Terinte N., Ibbett R., Schuster K.C. Overview on Native Cellulose and Microcrystalline Cellulose I Structure Studied by X-Ray Diffraction (WAXD): Comparison Between Measurement Techniques. *Lenzinger Berichte*, 2011, v. 89, pp. 118–131.
- [14] Yao W., Weng Y., Catchmark J.M. Improved cellulose X-ray diffraction analysis using Fourier series modeling. *Cellulose*, 2020, v. 27, pp. 5563–5579.
- [15] Alfred D. French Increment in evolution of cellulose crystallinity analysis. *Cellulose*, 2020, v. 27, pp. 5445–5448.
- [16] Sai Prasanna N, Mitra J. Isolation and characterization of cellulose nanocrystals from Cucumis sativus peels. *Carbohydrate Polymers*, 2020, no. 1, p. 116706.
- [17] Suciyati S.W., Manurung P., Sembiring S., Situmeang R. Comparative study of Cladophora sp. cellulose by using FTIR and XRD. *J. of Physics: Conference Series*, 2021, v. 1751, p. 012075.
- [18] Segal L., Creely J.J., Martin A.E.Jr., Conrad C.M. An Empirical Method for Estimating the Degree of Crystallinity of Native Cellulose using X-ray Diffractometer. *Tex. Res. J.*, 1959, v. 29, pp. 786–794.
- [19] Szczesniak L., Rachocki A., Tritt-Goc J. Glass transition temperature and thermal decomposition of cellulose powder. *Cellulose*, 2008, v.15, pp. 445–451.
- [20] Gao Z., Li N., Chen M., Yi W. Comparative study on the pyrolysis of cellulose and its model compounds. *Fuel Process Technol.*, 2019, v. 193, p. 131.
- [21] Yang H., Yan R., Chen H., Lee D.H., Zheng C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 2007, v. 86, pp. 1781–1788.
- [22] Salmen N.L, Back E.L. The influence of water on the glass phase transition temperature of cellulose. *TAPPI*, 1977, v. 60, no. 12, pp. 137–140.
- [23] Kargin V.A., Kozlov P.V., Wang Naichan. *O temperature steklovaniya tsellyulozy* [On the glass transition temperature of cellulose]. *Doklady AN SSSR* [Reports of the Academy of Sciences of the USSR], 1960, v. 130, no. 2, pp. 356–358.
- [24] Kichigina G.A., Kushch P.P., Kiryukhin D.P., Barelko V.V., Dorokhov V.G., Bykov L.A., Kuznetsov M.V. *Ispol'zovanie rastvorov radiatsionno-sintezirovannykh telomerov tetrafluoretilena dlya modifitsirovaniya steklotkani* [The use of solutions of radiation-synthesized tetrafluoroethylene telomers for modifying glass fabric]. [Chemical Technology], 2015, no. 6, pp. 326–333.
- [25] Nandiyanto A.B.D., Rahman T., Fadhlluloh M.A., Abdullah A.G., Hamidah I., Mulyanti B. Synthesis of silica particles from rice straw waste using a simple extraction method. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2016, v. 128, p. 012040.
- [26] Andresen M., Johansson L-S., Tanem B.S., Stenius P. Properties and characterization of hydrophobized micro fibrillated cellulose. *Cellulose*, 2006, v. 13, pp. 665–677.
- [27] Stenstad P., Andresen M., Tanem B.S., Stenius P. Chemical surface modifications of micro fibrillated cellulose. *Cellulose*, 2008, v. 15, pp. 35–45.
- [28] Johansson L.-S., Campbell J.M., Koljonen K., Stenius P. Evaluation of surface lignin on cellulose fibers with XPS. *Applied Surface Science*, 1999, v. 144–145, pp. 92–95
- [29] Andresen M., Per Stenstad, T. Møretro T., Langsrud S., Syverud K., Johansson L.-S., Stenius P. Nonleaching Antimicrobial Films Prepared from Surface-Modified Micro fibrillated Cellulose. *Biomacromolecules*, 2007, v. 8, pp. 2149–2155.

## Acknowledgments

*The work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of state assignments (state registration nos. 6) using UNU «Gammatok-100», equipment of the Analytical Center for Collective Use of the Federal Research Center for PCP and the Moscow Chemistry of the Russian Academy of Sciences and the Federal Research Center for Solid State Physics of the Russian Academy of Sciences in Chernogolovka.*

## Authors' information

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

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

**Kabachkov Evgeny Nikolaevich** — Researcher, Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, Federal Research Center for Solid State Physics, evgen.ken@mail.ru

**Kichigina Galina Anatolyevna** — Cand. Sci. (Chem.), Senior Researcher, Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, kga@icp.ac.ru

**Kushch Pavel Prokofievich** — Cand. Sci. (Chem.), Senior Researcher, Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, kpp@icp.ac.ru

**Kiryukhin Dmitry Pavlovich** <sup>✉</sup> — Dr. Sci. (Chem.), Chief Researcher, Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, kir@icp.ac.ru

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

**Badamshina Elmira Rashatovna** — Dr. Sci. (Chem.), Deputy Director of IPCP RAS, Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, badamsh@icp.ac.ru

**Soldatenkov Timofei Alekseevich** — Student of the Faculty of Fundamental Physical and Chemical Engineering, Lomonosov Moscow State University. M.V. Lomonosov, mr.soldatenckow201@gmail.com

**Vasilets Viktor Nikolaevich** — Dr. Sci. (Chem.), Leading Researcher, Branch of the Federal Research Center for Chemical Physics named after A.I. N.N. Semenov RAS, vnvasilets@yandex.ru

**Milovich Filipp Olegovich** — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, National University of Science and Technology MISIS, filippmilovich@mail.ru

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

Received 16.06.2022.

Approved after review 28.06.2022.

Accepted for publication 05.12.2022.

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

## ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ ЭЛЕКТРОАДГЕЗИОННЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Ю.М. Евдокимов✉, В.А. Сулименко, А.В. Мещеряков, Д.В. Русских

Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4

evdokur@mail.ru

Рассмотрена история создания первых электроадгезионных соединений и их особенности. Приведены физико-химические и другие характеристики, области использования. Показан значительный вклад в развитие этого направления науки и технологии отечественных ученых.

**Ключевые слова:** история адгезии, электроадгезионные соединения, внешнее электрическое поле

**Ссылка для цитирования:** Евдокимов Ю.М., Сулименко В.А., Мещеряков А.В., Русских Д.В. История создания электроадгезионных соединений // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 1. С. 107–113. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-107-113

Первые соединения твердых тел были получены под воздействием внешнего электрического поля (ВЭП) (открытый ранее эффект Johnsen — Rahbek отличается от методов, предложенных исследователями СССР и США) 55 лет тому назад одновременно в СССР и США [1–6]. Полученные в СССР соединения стали называть электроадгезионными соединениями (ЭАС) или electroadhesive Joints (EAJ). В США сохранились термины anodic welding (анодная сварка) и anodic bonding (анодные соединения). Позднее появились и иные соединения — электростатические, в частности, silicon on isolator (SOI), или кремний на изоляторе (КНИ). В последствии стали подразделять, указывая даже отдельные пары соединяемых материалов (сапфир на изоляторе, к примеру), что привело к терминологическому дискомфорту. Более того, в СССР иногда этот метод отождествляли с ранее известной «конденсаторной сваркой», в которой сцепление твердых тел происходило за счет нагрева зоны контакта, а не вследствие действия электростатического поля. Одним словом, некоторая неясность присутствовала [1–6], но время расставило все на свои места [7–42].

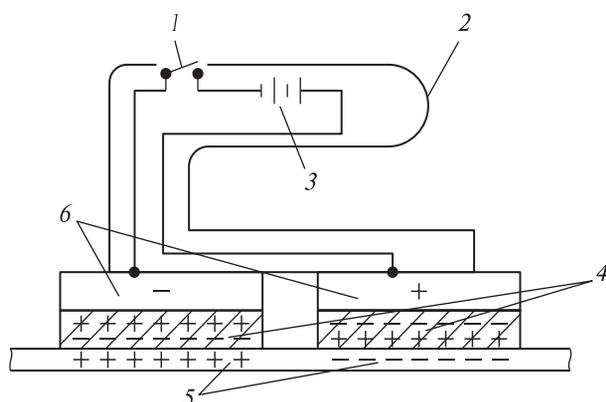
### Цель работы

Цель работы — ознакомление с подзабытыми и неизвестными фактами из истории создания первых ЭАС в мире.

С накоплением огромного фактического материала по изучению ЭАС и с развитием технологий их создания они были разделены на обратимые, полуобратимые и необратимые [3–6, 8, 9, 11–13, 18, 19, 21, 25, 26, 28, 29, 31, 32, 37, 40, 42]. Для необратимых электроадгезионных соединений сцепление между телами сохраняется в течение длительного времени (более 50 лет) без видимой потери прочности адгезионного соединения (ПАС),

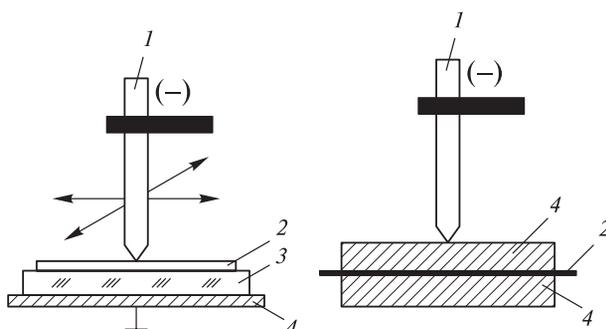
которая достигает 5...20 МПа и более, в зависимости от поданного напряжения, температуры в зоне контакта, времени протекания процесса, значений коэффициентов температурного расширения соединяемых твердых тел, шероховатости подложек (toughness), толщины окисной пленки  $h$  на металле (у алюминиевой фольги при контакте со стеклом ПАС была максимальной при  $h = 20...40$  нм, уменьшалась почти на порядок при  $h = 200$  нм, по данным В.А. Приходченко с соавт. Причем основные принципы создания необратимых ЭАС практически не отличались [5, 6] в первых публикациях (сцепление тел проявляется при приложении потенциала 100 В и выше, температуре начиная с 473 К и выше). При более высоких значениях температуры и напряжения требуется меньшее время на образование сопоставимых по прочности ЭАС. Для некоторых других типов ЭАС значения ПАС (или усилие притяжения), как правило, ниже (0,5...0,6 МПа), что следует из их определения.

Следует отметить, что ЭАС образуются на воздухе (или в иных газовых средах) без использования адгезивов за сравнительно короткое время (от 3–5 до 20 мин) для необратимых ЭАС и от долей секунды до 1–2 секунд для других типов ЭАС. К недостаткам метода получения необратимых соединений можно отнести высокие требования к чистоте и геометрии пластин (подложек), необходимость в некоторых случаях изготавливать соединение в помещениях класса ISO4 или ISO3 с шероховатостью поверхностей порядка 0,5 нм, хотя это касается в основном соединений, предназначенных для использования в микро- и нанoeлектронике. Альтернативы электроадгезионным соединениям практически нет, за исключением диффузионной и холодной сварки или открытого в последнее время нового типа лазерной «сварки» торцов стекла и металла, хотя каждый из перечисленных методов не проще метода получения ЭАС и ограничен в ассортименте соединяемых тел (рис. 1–3) [1, 4, 18, 31].



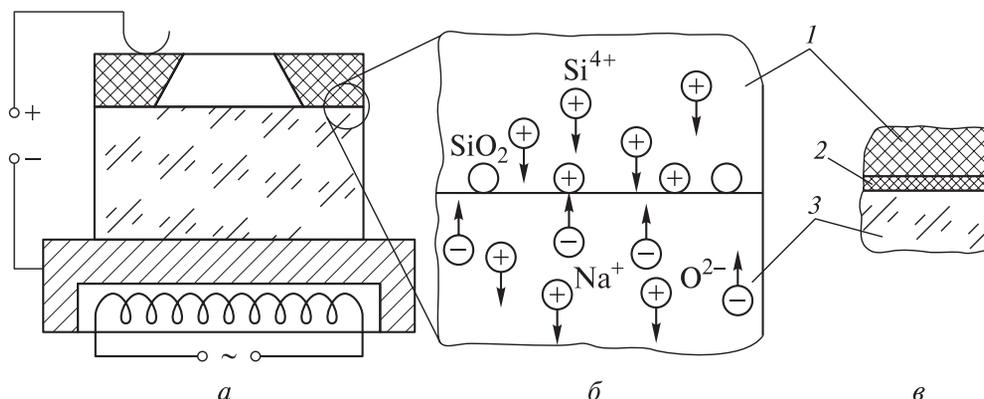
**Рис 1.** Схема работы первого захвата, работающего по законам электростатики [4] (после снятия внешнего электрического поля сцепление между телами исчезает): 1 — переключатель; 2 — изоляционная ручка; 3 — источник питания; 4 — изолятор (диэлектрик); 5 — закрепляемый материал; 6 — металлические электроды

**Fig. 1.** Scheme of operation of the first gripper according to the laws of electrostatics [4] (after the removal of the external electric field, the adhesion between the bodies disappears): 1 — switch; 2 — insulating handle; 3 — power supply; 4 — insulator (dielectric); 5 — fixed material; 6 — metal electrodes



**Рис 2.** Схема получения первых полуобратимых электроадгезионных соединений за время, равное 1–2 с, при действии неоднородного электрического поля [1]: 1 — металлическая игла, укрепленная на ручке из диэлектрика; 2 — полимерная пленка; 3 — стекло; 4 — металл

**Fig. 2.** Scheme of obtaining the first semi-reversible electroadhesive joints in a time equal to 1–2 s under the action of an inhomogeneous electric field [1]: 1 — metal needle mounted on a dielectric handle; 2 — polymer film; 3 — glass; 4 — metal



**Рис 3.** Схема получения необратимых электроадгезионных соединений кремния со стеклом: а — схема подведения разности потенциалов; б — схема ионного взаимодействия во время проведения процесса; в — область соединения после завершения процесса; 1 — кремний (Si), 2 — оксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ), 3 — стекло [18, 31] (сцепление сохраняется длительное время (потенциал порядка 1000 В); температура существенно ниже температуры плавления стекла, прочность соединения может достигать десятков мегапаскалей)

**Fig. 3.** Scheme for obtaining irreversible electroadhesive compounds of silicon with glass: а — scheme for supplying a potential difference; б — scheme of ionic interaction during the process; в — connection area after the process is completed; 1 — silicon (Si), 2 — silicon oxide ( $\text{SiO}_2$ ), 3 — glass [18, 31] (adhesion is retained for a long time (potential of about 1000 V); the temperature is much lower than the melting point of glass, the bond strength can reach tens of megapascals)

Электроадгезионные соединения широко используются в технике, самых различных производствах — от электроники, авиационной и космической отрасли (легкие астрономические адаптивные зеркала, элементы солнечных батарей) до пошива обуви, сварки (работы коллектива под руководством академика Б.Е. Патона) живых тканей и органов (желчного пузыря, печени,

кишечника), регулирования взаимодействиями типа ключ — замок, транспортировки грузов и манипулирования различными микро- и нанообъектами. Широкое коммерческое использование ЭАС получили при создании следующих устройств: прижимов, захватов, приводов, микропинцетов, узлов роботов и робототехнических устройств — робопчел, роботараканов,

робомуравьев, робомух, электростатических крепежных устройств (ЭКУ), манипуляторов, актуаторов, сенсоров, элементов, датчиков давления газов, узлов гироскопов, сверхбольших интегральных схем). При воздействии ВЭП можно добиться повышения прочности клеевых соединений древесины, улучшить процессы сепарации, электрофотографии, очистки поверхностей кремниевых пластин (wafer), сортировки деталей различных форм и размеров, создать устройства, облегчающие тушение пожаров в зданиях, крепление муфт для экзоскелетов, облегчить борьбу с налипанием вулканической пыли на корпус самолета и лопатки двигателя, сажи к самым различным подложкам, что подробно описано в работах [7–9, 11–16, 18–21, 23–25, 29–35, 37–42].

С помощью необратимых ЭАС можно соединять различные твердые тела: кремний — стекло, кремний — керамика, стекло — кремний — стекло, кремний — стекло — кремний, металл — керамика, металл — полимер; можно соединять полупроводники с различными материалами: кремний — вольфрам — оксид кремния (IV), алюминий — стекло, оксид кремния — ковар — кремний, металл — полупроводник — диэлектрик, кремний — стекло — углеродные нанотрубки, углеродные нанотрубки — стекло, графен — различные подложки, металл — (полупроводник) — сегнетоэлектрик [5, 6, 9, 11–14, 18–21, 26, 29, 31, 34, 36, 37, 39–42].

В СССР первые работы по созданию ЭАС проведены на кафедре химии Московского лесотехнического института [1, 2] и в Ленинградском электротехническом институте им. В.И. Ульянова (Ленина) в лаборатории В.Н. Таирова (работы В.А. Приходченко и Н.П. Косоговой [25, 28]). Впоследствии начался взрывной рост подобных работ [13–18, 22–26, 28–31, 38–39, 42]. Такая же ситуация наблюдалась начиная с первых публикаций в США [4–6] и заканчивая публикациями в десятках стран [7, 9, 11, 12, 19–21, 32–37, 40–42]. Сцепление тел в ЭАС осуществляется за счет кулоновских сил притяжения или пондеромоторных (механическое давление  $p$ ) сил электрического поля (наличие сегнетоэлектрических прослоек увеличивает значение  $p$  до нескольких мегапаскалей за счет высоких показателей диэлектрической постоянной сегнетоэлектриков, достигающих значения 10 000 и более). Это давление  $p$  можно рассчитать оценочно или точно [2–4, 16, 25, 32, 38]. Средние значения  $p$  около 6...7 кПа при воздушном зазоре  $h = 0,3$  мкм между скрепляемым материалом и ЭКУ планарного типа в резко неоднородном электрическом поле. При образовании необратимых ЭАС возможно проявление широкого спектра взаимодействий (от межмолекулярных и водородных связей до химических

типа Si-OH-OH-Si, Si-O-O-Si и сил Казимира для микрообъектов и нанообъектов) в зависимости от природы соединяемых тел, использованных схем и способов осуществления ЭАС [2–6, 11, 12, 16, 18, 19, 25, 28–35, 38, 42].

В перспективе использование ЭАС будет расширяться. Об этом свидетельствуют сотни статей в области электроадгезии, написанные и опубликованные огромным количеством исследователей, работающих над указанными технологиями.

## Выводы

История создания первых в мире ЭАС и технологий их осуществления с учетом приоритетной роли советской (российской) адгезионной школы показала возможность получения прочных соединений твердых тел в атмосферных условиях без использования клеев, что оказалось актуальным при изготовлении изделий микрорадиоэлектроники.

Несмотря на давность получения ЭАС, остаются возможности для дальнейшего совершенствования способов их изготовления и улучшения характеристик.

## Список литературы

- [1] Ивлев И.М., Евдокимов Ю.М., Москвитин Н.И. Изготовление и нарушение склеек внешним электрическим полем // Сборник работ МЛТИ. М.: Изд-во МЛТИ, 1967. Вып. 19. С. 110–114.
- [2] Евдокимов Ю.М. Исследование электроадгезионных явлений и возможности создания и нарушения адгезионного контакта действием внешнего электрического поля: дис. ... канд. хим. наук. М.: Изд-во МТИЛПИ, 1968, 137 с.
- [3] Евдокимов Ю.М., Кестельман В.Н., Кондратьев Е.М. Электроадгезионные соединения // Теория и практика. М.: МГУЛ, 2004, 394 с.
- [4] Krape R.P. Application study electroadhesive devices // NASA report CR-1211, Washington, D.C., Oktober 1968, 78 p.
- [5] Pomerantz D.J. Anodic bonding. Patent USA 3397278. August 13, 1968.
- [6] Wallis G., Pomerantz D.J. Field assisted glass-metal sealing // Appl. Phys., 1969, v. 40, no 10, pp. 3946–3949.
- [7] Nakamura T., Yamamoto A. Modeling and control of electroadhesion force in DC voltage // Robomech Journal, 2017, v. 4, no. 18; <https://doi.org/10.1186/s40648-017-0085-3>
- [8] Евдокимов Ю.М., Сулименко В.А. Использование электроадгезии в нанотехнологии // Наноструктурные материалы — 2016, Беларусь — Россия — Украина, Материалы V Междунар. конф. Минск, 22–25 ноября 2016. Минск: Белорусская наука, 2016. С. 458–461.
- [9] Andrieu F., Makovejev S., Kilchytka V., Olsen S., Md Arshad M.K., Raskin J.-P., Flandre D. Impact of self-heating and substrate effects on small-signal output conductance in UTBB SOI MOSFETs // Solid-State Electronics, 2012, v. 71, p. 93–100. DOI:10.1016/j.sse.2011.10.027
- [10] Пинчук Л.С., Гольдаде В.А. Электретные материалы в машиностроении. Гомель: Инфотрибо, 1998. 288 с.

- [11] Wei J., Nai S.M.L., Wong C.K., Lee L.C. Glass-to-glass anodic bonding process and electrostatic force // *Thin Solid Films*, 2004, v. 462–463, pp. 487–491.
- [12] Bergh M. Wafer bonding –Problems and Possibilities. Doctoral thesis. Chalmers University of Technology, 1998. URL: <https://research.chalmers.se/en/publication/888> (дата обращения 22.05.2022).
- [13] Скупов А. Анодная и непосредственная сварка пластин для микроэлектроники. Выбор материалов и ключевые параметры // *Вектор высоких технологий*, 2015, № 5 (18). С. 36–44
- [14] Мальцев П.П., Чаплыгин Ю.А., Тимошенко С.П. Перспективы развития технологии кремний-на-изоляторе // *Изв. вузов. Электроника*, 1998, № 5. С. 5–11.
- [15] Иванова Т.В., Пщелко Н.С., Жуков В.А. Модификация свойств пленочных покрытий при их электроадгезионной обработке // *Вестник Псковского государственного университета. Сер. Естественные и физико-математические науки*, 2022. Т. 15. № 3. С. 69–76.
- [16] Пщелко Н.С. Электрофизические методы неразрушающего контроля и формирования металлодиэлектрических структур: дис. ... д-ра техн. наук : 05.11.13, 05.27.06. Санкт-Петербург, 2011, 372 с.
- [17] Дерягин Б.В., Кротова Н.А., Смилга В.П. Адгезия твердых тел. М.: Наука, 1973. 280 с.
- [18] Синев Л.С. Расчет и выбор режимов электростатических соединений кремния со стеклом по критерию минимума остаточных напряжений: дис. ... канд. техн. наук. М., МГТУ им. Баумана Н.Э., 2016, 119 с.
- [19] Overney R.M., Tyndall G.W., Frommer J. Springer Handbook of Nanotechnology. Ed. B. Bhushan, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2004. DOI:10.1007/978-3-540-29857-1\_45
- [20] Electrostatics and its application / Ed. A.D. Moore. Wiley, New York, 1973, 481 p.
- [21] Tiwari E., Chandra S. The silicon-to-silicon anodic bonding using sputter deposited intermediate glass layer // *J. Nano Electron. Phys.*, 2011, no. 1, pp. 418–425.
- [22] Ахметов Б.С., Михайлов П.Г., Ожикенов К.А. Технологии формирования и контроля неразъемных соединений кремния и стекла в микромеханических узлах и измерительных модулях интеллектуальных датчиков // *Вестник Национальной академии наук Республики Казахстан*, 2004, № 4. С. 20–24.
- [23] Шендриков М.А. Повышение прочности клеевых соединений путем модифицирования клея электрическим полем: автор. дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, Изд-во ВГУ, 2011, 24 с.
- [24] Богомольный В.М. Электроадгезионное соединения диэлектрических и электропроводных материалов // *Конструкции из композитных материалов*, 2011, № 4, С. 38–43.
- [25] Абраров В.Н. Электроадгезионные захваты и закрепляющие устройства гибких производственных систем. М.: Энергоатомиздат, 1991. 160 с.
- [26] Хоменко Н.Н., Лизин А.И., Барбаш С.В. Техника и технология сварки в электрическом поле крупногабаритных стеклокремниевых узлов-заготовок // *Приборы и системы управления*, 1992. № 8. С. 41–43.
- [27] Берлин А.А., Басин В.Е. Основы адгезии полимеров. М.: Химия, 1974. 391 с.
- [28] Приходченко В.А., Таиров В.Н., Хомылев А.Ф. Электроадгезионное соединение диэлектриков с малыми температурными коэффициентами расширения // *Изв. ЛЭТИ*, 1982. Вып. 302. С. 90–93.
- [29] Косцов Э.Г. Обратимый электростатический «клей» // *Наука из первых рук*, 2009. Т. 26. № 2. С. 8–9.
- [30] Gradetsky V.G., Ermolov I.L., Knyazkov M.M., Semenov E.A., Sukhanov A.N. The experimental investigation of the sensitivity in the exoskeleton control loop. In V. G. Gradetsky, M. O. Tokhi, N. N. Bolotnik, M. Silva, G. S. Virk (Eds.), *Robots in Human Life // CLAWAR 2020: 23rd International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, Moscow, Russian Federation, 24–26 August 2020. <https://doi.org/10.13180/clawar.2020.24-26.08.55>
- [31] Козлов И.К., Сироткин Д.Г. Исследования и разработки в области анодной сварки // *Труды Нижегородского Государственного технического университета им. П.Е. Алексеева*, 2014, № 5 (107), С. 426–432.
- [32] Monkman G.J. Compliant Robotic Devices and Electroadhesion // *Robotica*, 1992, v. 10, pp. 183–185.
- [33] Mizes H.A. Adhesion of small particles in electric fields // *J. of Adhesion Science and Technology*, 1994, v. 8, no. 8, pp. 937–951.
- [34] Schmidt M.A. Wafer-to-Wafer Bonding for Microstructure Formation. Invited Paper // *Proc. of the IEEE*, 1998, v. 86, no. 8, pp. 1575–1583.
- [35] Graule M.A., Chirattananon P., Fuller S.B., Jafferis N.T. Perching and takeoff of a robotic insect on overhangs using switchable electrostatic adhesion // *Science*, 2016, v. 352, iss. 6288, pp. 978–982. DOI: 10.1126/science.aaf1092
- [36] Евдокимов Ю.М., Фиговский О.Л., Кестельман В.Н. Электроадгезия – итог (открытие, развитие, перспективы) // *Сб. тезисов докладов X ежегодной конф. НОР. М.: Изд-во Общероссийской общественной организации «Российское профессорское собрание»*, 2019. С. 43–45.
- [37] Evdokimov Yu.M., Kestelman V.N., Schindel-Bidinelli E. Electroadhesive Joints with glass // *Gordon Research Conference «Bonding to glass»*. USA: University of Missouri, 1994, pp. 1–4.
- [38] Кондратьев Е.М., Евдокимов Ю.М. Электрические силы, действующие на диэлектрические поверхности // *Научные труды МГУЛ. М.: МГУЛ*, 1996. Вып. 287. С. 69–73.
- [39] Березин Л.Я. Некоторые особенности сварки в электростатическом поле диэлектриков с металлами и между собой // *Автоматическая сварка*, 2001. № 8. С. 45–48.
- [40] Bergstedt L., Persson K. Printed Glass for Anodic Bonding A Packaging Concept for MEMS and System On a Chip // *Advancing Microelectronics*, 2002, v. 29, no. 1, pp. 1–4.
- [41] Gaunekar G.S. Implementation of electroadhesion based astrictive prehension system // *Intern. J. of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering (IJARECE)*, 2016, v. 5, iss. 11, pp. 2503–2510.
- [42] Guo J., Bamber T., Petzing J., Justham L., Jackson M. Experimental study of relationship between interfacial electroadhesive force and applied voltage for different substrate materials // *Applied physics Letters*, 2017, v. 110, p. 051602.

## Сведения об авторах

**Евдокимов Юрий Михайлович**  — канд. хим. наук, профессор кафедры процессов горения Академии Государственной противопожарной службы МЧС России, [evdokur@mail.ru](mailto:evdokur@mail.ru)

**Сулименко Владимир Анатольевич** — канд. техн. наук, профессор кафедры процессов горения Академии Государственной противопожарной службы МЧС России, [sulimenko39@yandex.ru](mailto:sulimenko39@yandex.ru)

**Мещеряков Алексей Викторович** — начальник Учебно-Научного Комплекса Академии Государственной противопожарной службы МЧС России, [malviktp@gmail.ru](mailto:malviktp@gmail.ru)

**Русских Дмитрий Викторович** — зав. кафедрой процессов горения Академии Государственной противопожарной службы МЧС России, [russcience@mail.ru](mailto:russcience@mail.ru)

Поступила в редакцию 15.08.2022.

Одобрено после рецензирования 29.09.2022.

Принята к публикации 19.12.2022.

## THE HISTORY OF THE CREATION OF ELECTROADHESIVE JOINTS

**Yu.M. Evdokimov** , **V.A. Sulimenko**, **A.V. Meshcheryakov**, **D.V. Russkikh**

State Fire Academy of EMERCOIM of Russia, 4, Boris Galushkina st., 129366, Moscow, Russia

[evdokur@mail.ru](mailto:evdokur@mail.ru)

The history of the first electroadhesive joints, their features, physical-chemical and other characteristics are considered. A significant contribution to the development of these directions of science and technology of Soviet (Russian) scientists is shown.

**Keywords:** history of adhesion, electroadhesive joints, external electric field

**Suggested citation:** Evdokimov Yu.M., Sulimenko V.A., Meshcheryakov A.V., Russkikh D.V. *Istoriya sozdaniya elektroadgezionnykh soedineniy* [The history of the creation of electroadhesive joints]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 1, pp. 107–113. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-107-113

## References

- [1] Ivlev I.M., Evdokimov Yu.M., Moskvitin N.I. *Izgotovlenie i narushenie skleek vneshnim elektricheskim polem* [Making and breaking glues by an external electric field]. *Sbornik rabot MLTI* [Collection of works of MLTI]. Moscow: MLTI, 1967, iss. 19, pp. 110–114.
- [2] Evdokimov Yu.M. *Evdokimov Yu.M. Issledovanie elektroadgezionnykh yavleniy i vozmozhnosti sozdaniya i narusheniya adgezionnogo kontakta deystviem vneshnego elektricheskogo polya* [Investigation of electroadhesive phenomena and the possibility of creating and breaking adhesive contact by the action of an external electric field]. *Diss. Cand. Sci. (Chem.)*. Moscow: MTILP, 1968, 137 p.
- [3] Evdokimov Yu.M., Kestel'man V.N., Kondrat'ev E.M. *Elektroadgezionnye soedineniya* [Electroadhesive compounds]. *Teoriya i praktika* [Theory and practice]. Moscow: MSFU, 2004, 394 p.
- [4] Krape R.P. Application study electroadhesive devices. NASA report CR-1211, Washington, D.C., Oktober 1968, 78 p.
- [5] Pomerantz D.J. Anodic bonding. Patent USA 3397278. August 13, 1968.
- [6] Wallis G., Pomerantz D.J. Field assisted glass–metal sealing. *Appl. Phys.*, 1969, v. 40, no 10, pp. 3946–3949.
- [7] Nakamura T., Yamomoto A. Modeling and control of electroadhesion force in DC voltage. *Robomech Journal*, 2017, v. 4, no. 18; <https://doi.org/10.1186/s40648-017-0085-3>
- [8] Evdokimov Yu.M., Sulimenko V.A. *Ispol'zovanie elektroadgezii v nanotekhnologii* [The use of electroadhesion in nanotechnology]. *Nanostrukturnye materialy — 2016, Belarus' — Rossiya — Ukraina, Materialy V Mezhdunarodnoy konferentsii* [Nanostructural Materials — 2016, Belarus — Russia — Ukraine, Proceedings of the V International Conference], Minsk. November 22–25, 2016. Minsk: Belarusian Science, 2016, pp. 458–461.
- [9] Andrieu F., Makovejev S., Kilchytska V., Olsen S., Md Arshad M.K., Raskin J.-P., Flandre D. Impact of self-heating and substrate effects on small-signal output conductance in UTBB SOI MOSFETs. *Solid-State Electronics*, 2012, v. 71, p. 93–100. DOI:10.1016/j.sse.2011.10.027
- [10] Pinchuk L.S., Gol'dade V.A. *Elektretnye materialy v mashinostroenii* [Electret materials in mechanical engineering]. Gomel: Infotribo, 1998, 288 p.
- [11] Wei J., Nai S.M.L., Wong C.K., Lee L.C. Glass-to-glass anodic bonding process and electrostatic force. *Thin Solid Films*, 2004, v. 462–463, pp. 487–491.
- [12] Bergh M. Wafer bonding –Problems and Possibilities. Doctoral thesis. Chalmers University of Technology, 1998. Available at: <https://research.chalmers.se/en/publication/888> (accessed 22.05.2022).
- [13] Skupov A. *Anodnaya i neposredstvennaya svarka plastin dlya mikroelektroniki. Vybor materialov i klyucheveye parametry* [Anode and direct welding of plates for microelectronics. The choice of materials and key parameters]. *Vektor vysokikh tekhnologii* [Vector High Technologies], 2015, no. 5 (18), pp. 36–44.

- [14] Mal'tsev P.P., Chaplygin Yu.A., Timoshenkov S.P. *Perspektivy razvitiya tekhnologii kremniy-na-izolyatore* [Prospects for the development of silicon-on-insulator technology]. *Izvestiya vuzov. Elektronika* [Izvestiya vuzov. Elektronika], 1998, no. 5, pp. 5–11.
- [15] Ivanova T.V., Pshchelko N.S., Zhukov V.A. *Modifikatsiya svoystv plenochnykh pokrytiy pri ikh elektroadgezionnoy obrabotke* [Modification of the properties of film coatings during their electroadhesive processing]. *Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i fiziko-matematicheskie nauki* [Bulletin of the Pskov State University. Series: Natural and Physical and Mathematical Sciences], 2022, v. 15, no. 3, pp. 69–76.
- [16] Pshchelko N.S. *Elektrofizicheskie metody nerazrushayushchego kontrolya i formirovaniya metallodielektricheskikh struktur* [Electrophysical methods of non-destructive testing and formation of metal-dielectric structures]. Diss. Dr. Sci. (Tech.), 05.11.13, 05.27.06. St. Petersburg, 2011, 372 p.
- [17] Deryagin B.V., Krotova N.A., Smilga V.P. *Adgeziya tverdykh tel* [Adhesion of solids]. Moscow: Nauka, 1973, 280 p.
- [18] Sinev L.S. *Raschet i vybor rezhimov elektrostatoicheskikh soedineniy kremniya so steklom po kriteriyu minimuma ostatochnykh napryazheniy* [Calculation and selection of modes of electrostatic silicon-glass joints according to the criterion of minimum residual stresses]. Diss. Cand. Sci. (Tech.). Moscow: MSTU im. Bauman N.E., 2016, 119 p.
- [19] Overney R.M., Tyndall G.W., Frommer J. *Springer Handbook of Nanotechnology*. Ed. B. Bhushan, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2004. DOI:10.1007/978-3-540-29857-1\_45
- [20] *Electrostatics and its application*. Ed. A.D. Moore. Wiley, New York, 1973, 481 p.
- [21] Tiwari E., Chandra S. The silicon-to-silicon anodic bonding using sputter deposited intermediate glass layer. *J. Nano Electron. Phys.*, 2011, no. 1, pp. 418–425.
- [22] Akhmetov B.S., Mikhaylov P.G., Ozhikenov K.A. *Tekhnologii formirovaniya i kontrolya neraz'emnykh soedineniy kremniya i stekla v mikromekhanicheskikh uzlakh i izmeritel'nykh modulyakh intellektual'nykh datchikov* [Technologies for the formation and control of permanent silicon and glass joints in micromechanical units and measuring modules of intelligent sensors]. *Vestnik Natsional'noy akademii nauk Respubliki Kazakhstan* [Bulletin of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan], 2004, no. 4, pp. 20–24.
- [23] Shendrikov M.A. *Povyshenie prochnosti kleevykh soedineniy putem modifitsirovaniya kleya elektricheskim polem* [Increasing the strength of adhesive joints by modifying the adhesive with an electric field]. Diss. Cand. Sci. (Tech.). Voronezh, VSU, 2011, 24 p.
- [24] Bogomol'nyy V.M. *Elektroadgezionnoe soedineniya dielektricheskikh i elektroprovodnykh materialov* [Electroadhesive bonding of dielectric and electrically conductive materials]. *Konstruktsii iz kompozitnykh materialov* [Structures from composite materials], 2011, no. 4, pp. 38–43.
- [25] Abrarov V.N. *Elektroadgezionnye zakhvaty i zakrepyayushchie ustroystva gibkikh proizvodstvennykh sistem* [Electroadhesive grippers and fixing devices for flexible production systems]. Moscow: Energoatomizdat, 1991, 160 p.
- [26] Khomenko N.N., Lizin A.I., Barbash S.V. *Tekhnika i tekhnologiya svarki v elektricheskoy pole krupnogabaritnykh steklokremniyevykh uzlov-zagotovok* [Technique and technology of welding in an electric field of large-sized glass-silicon assemblies-blanks]. *Pribory i sistemy upravleniya* [Instruments and control systems], 1992, no. 8, pp. 41–43.
- [27] Berlin A.A., Basin V.E. *Osnovy adgezii polimerov* [Fundamentals of polymer adhesion]. Moscow: Chemistry, 1974, 391 p.
- [28] Prikhodchenko V.A., Tairov V.N., Khomylev A.F. *Elektroadgezionnoe soedinenie dielektrikov s malymi temperaturnymi koeffitsientami rasshireniya* [Electroadhesive bonding of dielectrics with low thermal expansion coefficients]. *Izv. LETI*, 1982, iss. 302, pp. 90–93.
- [29] Kostov E.G. *Obratimyy elektrostatoicheskyy «kley»* [Reversible electrostatic «glue»]. *Nauka iz pervykh ruk* [Nauka first hand], 2009, v. 26, no. 2, pp. 8–9.
- [30] Gradetsky V.G., Ermolov I.L., Knyazkov M.M., Semenov E.A., Sukhanov A.N. The experimental investigation of the sensitivity in the exoskeleton control loop. In V. G. Gradetsky, M. O. Tokhi, N. N. Bolotnik, M. Silva, G. S. Virk (Eds.), *Robots in Human Life. CLAWAR 2020: 23rd International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, Moscow, Russian Federation, 24–26 August 2020. <https://doi.org/10.13180/clawar.2020.24-26.08.55>
- [31] Kozlov I.K., Sirotkin D.G. *Issledovaniya i razrabotki v oblasti anodnoy svarki* [Research and development in the field of anode welding]. *Trudy Nizhegorodskogo Gos. Tekhnicheskogo Universiteta im R.E. Alekseeva* [Proceedings of the Nizhny Novgorod State University. Technical University named after R.E. Alekseeva], 2014, no. 5 (107), pp. 426–432.
- [32] Monkman G.J. Compliant Robotic Devices and Electroadhesion. *Robotica*, 1992, v. 10, pp. 183–185.
- [33] Mizes H.A. Adhesion of small particles in electric fields. *J. of Adhesion Science and Technology*, 1994, v. 8, no. 8, pp. 937–951.
- [34] Schmidt M.A. Wafer-to-Wafer Bonding for Microstructure Formation. Invited Paper. *Proc. of the IEEE*, 1998, v. 86, no. 8, pp. 1575–1583.
- [35] Graule M.A., Chirarrattananon P., Fuller S.B., Jafferis N.T. Perching and takeoff of a robotic insect on overhangs using switchable electrostatic adhesion. *Science*, 2016, v. 352, iss. 6288, pp. 978–982. DOI: 10.1126/science.aaf1092
- [36] Evdokimov Yu.M., Figovskiy O.L., Kestel'man V.N. *Elektroadgeziya — itog (otkrytie, razvitie, perspektivy)* [Electroadhesion — the result (discovery, development, prospects)]. *Sbornik tezisov dokladov Kh ezhegodnoy konferentsii NOR* [Collection of abstracts of the X annual conference NOR]. Moscow: All-Russian public organization «Russian professorial meeting», 2019, pp. 43–45.
- [37] Evdokimov Yu.M., Kestelman V.N., Schindel-Bidinelli E. Electroadhesive Joints with glass. *Gordon Research Conference «Bonding to glass»*. USA: University of Missouri, 1994, pp. 1–4.
- [38] Kondrat'ev E.M., Evdokimov Yu.M. *Elektricheskie sily, deystvuyushchie na dielektricheskie poverkhnosti* [Electric forces acting on dielectric surfaces]. *Nauchnye trudy MGUL* [Nauchnye trudy MGUL]. Moscow: MSFU, 1996, iss. 287, pp. 69–73.
- [39] Berezin L.Ya. *Nekotorye osobennosti svarki v elektrostatoicheskoy pole dielektrikov s metallami i mezhdub soboy* [Some features of welding in an electrostatic field of dielectrics with metals and between themselves]. *Avtomaticheskaya svarka* [Avtomaticheskaya svarka], 2001, no. 8, pp. 45–48.

- [40] Bergstedt L., Persson K. Printed Glass for Anodic Bonding A Packaging Concept for MEMS and System On a Chip. *Advancing Microelectronics*, 2002, v. 29, no. 1, pp. 1–4.
- [41] Gaunekar G.S. Implementation of electroadhesion based astrictive prehension system. *Intern. J. of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering (IJARECE)*, 2016, v. 5, iss. 11, pp. 2503–2510.
- [42] Guo J., Bamber T., Petzing J., Justham L., Jackson M. Experimental study of relationship between interfacial electroadhesive force and applied voltage for different substrate materials. *Applied physics Letters*, 2017, v. 110, p. 051602.

## Authors' information

**Evdokimov Yuriy Mikhaylovich**✉ — Cand. Sci. (Chem.), Professor of the Department of Process of fire, State Fire Academy of EMERCOM, Moscow, edvdokur@mail.ru

**Sulimenko Vladimir Anatol'evich** — Cand. Sci. (Tech.), Professor of the Department of Process of fire, State Fire Academy of EMERCOM, Moscow, sulimenko39@yandex.ru

**Meshcheryakov Aleksey Viktorovich** — Head of the Department of Process of fire, State Fire Academy of EMERCOM, Moscow, malviktp@gmail.com

**Russkikh Dmitriy Viktorovich** — Head of the Department of Process of fire, State Fire academy of EMERCOM, Moscow, russcience@mail.ru

Received 15.08.2022.

Approved after review 29.09.2022.

Accepted for publication 19.12.2022.

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

## МЕХАНОАКТИВАЦИОННЫЙ СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ВЯЖУЩЕГО ДЛЯ УСТРОЙСТВА ЦЕМЕНТОГРУНТОВЫХ СВАЙ

Н.Г. Серегин<sup>1</sup>✉, В.И. Запруднов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское ш., д. 26

<sup>2</sup>Мытищинский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», 141005, Россия, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

SereginNG@mgsu.ru

Рассмотрены физико-химические процессы измельчения веществ механоактивационным способом. Приведен анализ процессов, происходящих в твердых телах во время их механической обработки. Описаны основные виды дефектов, возникающих в процессе механической обработки слоистых силикатов. Представлены такие наиболее распространенные типы мельниц, как дезинтеграторы и планетарные мельницы, предназначенные для механоактивации. Охарактеризованы принципы их работы. Дана классификация мельниц, предназначенных для помола клинкера. Проанализирована зависимость удельных энергозатрат на помол клинкера и прочности образцов от типа мельницы. Исследована зависимость удельной поверхности измельченного клинкера и прочности образцов от скорости ротора ударно-отражательной мельницы. Сформулированы рекомендации по выбору типа мельниц для помола клинкера.

**Ключевые слова:** бурсмесительный способ, свайный фундамент, цементогрунтовые сваи, вяжущее, механоактивационный способ, клинкер

**Ссылка для цитирования:** Серегин Н.Г., Запруднов В.И. Механоактивационный способ получения вяжущего для устройства цементогрунтовых свай // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 1. С. 114–120. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-114-120

В настоящее время появились тенденции выделять под новое строительство территории, которые ранее не застраивались в связи со сложными инженерно-геологическими условиями. Они сформировались вследствие неоднородности в плане грунтовых напластований, просадочных и других типов грунтов. Поэтому проектные организации при конструировании фундаментов зданий и сооружений все чаще вынуждены прибегать к применению свай [1, 2].

В Российской Федерации свайные фундаменты в общем объеме фундаментов составляют примерно 25 % [3]. Свайные фундаменты получили широкое распространение в практике мирового фундаментостроения [4], поскольку обеспечивают возможность возведения зданий и инженерных сооружений на грунтах с недостаточной несущей способностью, а также в условиях вечной мерзлоты. Внедрение промышленных методов строительства на современном этапе, оснащение строительных организаций мобильными высокопроизводительными машинами для производства свайных работ способствуют расширению применения свайных фундаментов [5, 6].

В целях борьбы с просадочностью грунтов для улучшения их свойств, применяют методы технической мелиорации [7]. При мощных толщах

просадочных грунтов наибольшей эффективностью отличаются буронабивные сваи, поскольку при бурении скважин грунт околоосвайного пространства уплотняется, что увеличивает несущую способность свай [8].

Особое место среди буронабивных свай занимают сваи, изготовленные бурсмесительным способом [9, 10]. Его использование предусматривает применение специальных бурсмесительных машин и буровых установок, имеющих вертлюги, полые буровые штанги и принудительную подачу бурового материала [11]. С помощью бурсмесительного способа закрепляют все виды слабых и структурно-неустойчивых грунтов независимо от их влажности, расположения горизонта подземных вод и коэффициента фильтрации вида грунтовых напластований [12]. Высокая экономичность способа за счет использования местных грунтов строительной площадки, низкой стоимости, полной механизации работ с перспективой закрепления грунтов делают бурсмесительный способ наиболее перспективным в фундаментостроении.

К изготавливаемым бурсмесительным способом сваям следует отнести и цементогрунтовые сваи, полученные посредством способа механоактивации [13]. Этот способ отличается экологической чистотой и возможностью применения как для новых, так и для усиления оснований существующих зданий и сооружений.

## Цель работы

Цель работы — характеристика механоактивационного способа получения вяжущего для устройства цементогрунтовых свай.

## Материалы и методы

Механоактивационный способ получения вяжущего выполняют в целях диспергирования и активации грунтов, как одной из важнейших технологических операций. Благодаря существованию механической активации появляется возможность решения разнообразных задач, в частности, повышения реакционной способности твердых тел, изменения их структуры, ускорения твердофазных реакций и др. [14].

Физико-химические процессы, обусловленные механическим воздействием на твердые тела, особенно интенсивно проявляются при измельчении веществ.

Экспериментальные исследования раскрыли особенности физико-химических процессов, что позволило создать модель механической активации, которая позволяет исследовать возникновение поля напряжений в результате механического воздействия в определенных областях твердого вещества [15]. Релаксация поля напряжений может происходить с выделением тепла, образованием новой поверхности и различного рода дефектов в кристаллах или возбуждением химических реакций в твердой фазе. В основном направление релаксации зависит от свойств вещества, условий нагружения и свойств частиц [16, 17].

Анализ процессов, происходящих в твердых телах во время их механической обработки, показывает, что существуют два основных физических процесса, которые способствуют возбуждению химических реакций в твердых телах: деформация кристаллов и их излом. В ходе этих процессов выделяется теплота, возникают сдвиговые напряжения и разрушение кристаллов, обычно сопровождающиеся локальным повышением температуры и давления, эмиссией света и электронов, разрывом химических связей на вновь образованных поверхностях. Вследствие этого особенно важное значение приобретает формирование активных центров на свежесформированных поверхностях [18].

Основными видами дефектов, возникающих в результате применения механоактивационного способа получения вяжущего слоистых силикатов, являются образование новой поверхности, сдвиговые напряжения в решетке и образование твердых продуктов физико-химических реакций [19]. Аналогом кремния в структурах силикатов является алюминий. При условии идентичности кристаллохимических позиций атомов Si и Al,

например, в качестве центральных атомов тетраэдров  $\text{SiO}_4$  и  $\text{AlO}_4$ , сочленение координационных полиэдров в структурах силикатов осуществляется через общие вершины двух соседних многогранников, что приводит к образованию каркасных или слоистых структур [20, 21].

Для более детальной классификации соединений силикатов требуется координационное число элемента по кислороду. К классу силикатов относятся соединения, в структурах которых металлический элемент является катионом, не входит в состав кремниево-кислородного радикала и имеет координационное число, не равное четырем. Если атом кремния изоморфно замещен атомом металла, то координационное число равно четырем, а последний входит в состав комплексного отрицательно заряженного кремния. Однако в ряде случаев координация металла по кислороду не имеет столь решающего значения [22, 23].

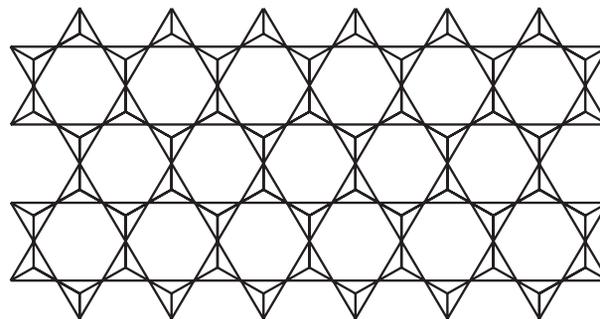


Рис. 1. Гексагональная сетка из  $\text{SiO}_4$ -тетраэдров в структуре слюды

Fig. 1. Hexagonal grid of  $\text{SiO}_4$  — tetrahedra in the mica structure

Для слоистых силикатов типичны пластинчатая морфология кристаллов, наличие хорошей спайности и гексагональной симметрии элементов. Черты сходства в структурах слоистых силикатов обусловлены тем, что в их основе лежат сетки из  $\text{SiO}_4$ -тетраэдров, связанных через общие вершины в гексагональную структуру. В качестве примера на рис. 1 показана гексагональная сетка из кремниево-кислородных тетраэдров в структурах слюды [24].

В идеализированной структурной модели слюды все координационные полиэдры и гексагональные тетраэдрические сетки геометрически правильные. Положение катионов в них центральное. Координационное число межслоевых катионов по кислороду постоянное и равно 12.

Современные представления о структуре слюды, не отрицая принципиальной правильности идеальной базовой модели, учитывают искажения основных структурных элементов, а именно, разворот  $\text{SiO}_4$ -тетраэдров в гексагональной сетке и ее гофрировку, неравноценность среднего межатомного расстояния, переменную координацию катионов межслоевого промежутка по кислороду и переменные значения межатомного расстояния [26].

Дислокации в структурах слоистых силикатов могут возникать путем сдвига сеток в пределах слоев, главным образом за счет смещения самих слоев в плоскости скольжения, совпадающей с плоскостью спайности. При наличии определенных условий дислокации могут перемещаться и располагаться с образованием дислокационных стенок или субграниц. В этом случае монокристалл слоистого силиката представляет собой агрегат, состоящий из дискретных симметрично разориентированных блоков, разделенных дислокационными стенками. Изменение дифракционной картины слоистых минералов по мере упорядочивания структуры обусловлено не только дислокациями, но и размерами блоков когерентного рассеяния, при уменьшении которых возрастает интегральный эффект изменения интенсивности рефлексов на рентгенограмме минерала [27].

Механоактивационный способ получения вяжущего применяют в измельчительной аппаратуре, поэтому следует учитывать особенности процессов, которые при этом протекают. Для получения ожидаемого после механической обработки результата существенное значение имеют характер формирования поля напряжений во времени и кинетика последующих релаксационных процессов. Если вещество разрушается, то каждая новая открывающаяся поверхность становится активной [28].

В мельницах удары мелющих тел действуют на их совокупность, которая подобна поликристаллу. При этом граница между частицами является препятствием для дислокаций. Таким образом, основные результаты теории разрушения поликристаллов можно применить к механической обработке в мельницах.

Для применения механоактивационного способа получения вяжущего наибольшее распространение среди мельниц получили дезинтеграторы и планетарные мельницы [29].

Принцип работы дезинтеграторов состоит в осуществлении быстро следующих один за другим ударов по активируемой частице при возрастающей относительной скорости движения частиц. Возрастание окружной скорости движения частиц происходит естественным образом по мере продвижения частицы от периферии к центру вращения дисков дезинтегратора. Благодаря высокой скорости вращения дисков в дезинтеграторах можно обеспечить очень высокий уровень подвода энергии к частице обрабатываемого вещества.

Планетарные мельницы представляют собой машины типа барабанных шаровых мельниц, в которых воздействие гравитационного поля на рабочее тело заменено центробежной силой. Это позволяет увеличить количество энергии, подводимой к частицам обрабатываемого вещества. К

недостаткам планетарных мельниц можно отнести невысокий коэффициент полезного действия (КПД) и технологические сложности при изготовлении машин большой производительности, что ограничивает их применение для крупнотоннажных процессов. К достоинствам дезинтеграторов причисляют возможность достижения различной производительности до 80...100 т/ч. Поэтому в строительстве для механической активации более перспективными ударно-отражательными мельницами являются дезинтеграторы.

Основные принципы конструкций роторов дезинтеграторов связаны с возникающей в веществе активацией, поскольку, чем больше их скорость ударов и чем меньше интервал между следующими один за другим ударами, тем большая возникает активность. Важно также и то, что скорости следующих один за другим ударами постоянно возрастают. Выполнение этого процесса обеспечивает конструкция дезинтеграторов. Активное состояние измельчения вещества, достигаемое в дезинтеграторе при помоле грунта, довольно устойчиво.

При одновременной обработке нескольких сырьевых компонентов в дезинтеграторах независимо от количественного их соотношения, различий в удельном весе и влажности, образуется гомогенная смесь. Высокая гомогенность смеси достигается при одновременной обработке жидкого и твердого сырья.

Однако если за один месяц хранения слоистых силикатов на открытом воздухе снижения их активности не наблюдается, то за 2 мес. активность снижается примерно на 10 % и полностью исчезает при таком хранении в течение 6 мес. [30].

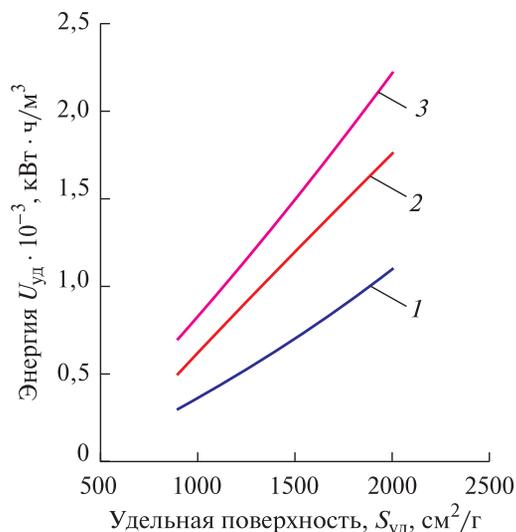
По виду нагружения мельницы классифицируют следующим образом:

- 1) с низкой скоростью нагружения и преимущественным нагружением сжатием (шаровые, стержневые, бегуны, центробежные, шарокольцевые);
- 2) со средней скоростью нагружения, разрушающие частицы (вибрационные, магнитно-вихревые, центробежно-планетарные);
- 3) с высокой скоростью нагружения, измельчающие материалы преимущественно свободным ударом (ударно-отражательного действия, ударные мельницы, дезинтеграторы, молотковые, роторные и струйные мельницы).

Таковы подходы реализации механоактивационного способа получения вяжущего для устройства цементогрунтовых свай.

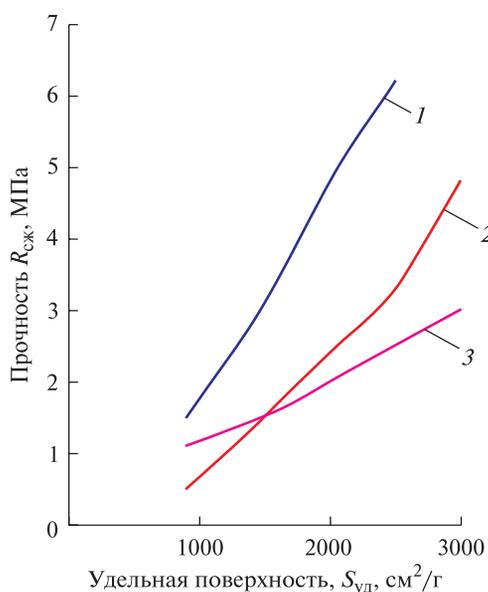
## Результаты исследования

Сравнение удельных энергозатрат и эффективности механоактивационного способа получения вяжущего с помощью трех мельниц, представителей трех групп приведенной классификации, а именно мельниц ударно-отражательного



**Рис. 2.** Удельные энергозатраты на помол клинкера в зависимости от типа мельницы: 1 — ударно-отражательная; 2 — вибрационная; 3 — шаровая

**Fig. 2.** Specific energy consumption for clinker grinding depending on the type of mill: 1 — impact-reflective; 2 — vibration; 3 — ball

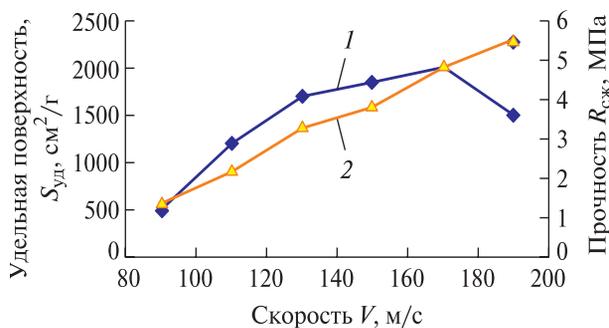


**Рис. 3.** Зависимость прочности образцов от типа мельницы: 1 — ударно-отражательная; 2 — вибрационная; 3 — шаровая

**Fig. 3.** Dependence of the strength of the samples on the type of mill: 1 — impact-reflective; 2 — vibration; 3 — ball

действия, шаровой и вибрационной показало следующие результаты. Исследования основаны на анализе зависимости удельных энергозатрат  $U_{уд}$  ( $10^{-3}$ кВтч/м³) на измельчение вещества (клинкера) от его удельной поверхности  $S_{уд}$  ( $см^2/г$ ), т. е.  $U_{уд} = f(S_{уд})$ .

Из рис. 2 видно, что мельницы с преимущественным нагружением сжатием так же, как и при разрушении одиночных частиц, наиболее энергоёмки. Разница в удельных энергозатратах стано-



**Рис. 4.** Зависимость удельной поверхности  $S_{уд}$  измельченного клинкера и прочности  $R_{сж}$  образцов от скорости ротора ударно-отражательной мельницы: 1 — удельная поверхность; 2 — прочность

**Fig. 4.** Dependence of the specific surface  $S_{уд}$  of crushed clinker and the strength  $R_{сж}$  of samples on the rotor speed of an impact mill: 1 — specific surface; 2 — strength

вится еще более заметной при увеличении производительности мельниц до 300...500 кг/ч и более.

Изменение свойств измельчаемых материалов механоактивационным способом наиболее наглядно можно продемонстрировать на таком объекте, как измельчаемый цементный клинкер по прочности образцов, сравниваемых при одинаковой удельной поверхности материала.

Из рис. 3 следует, что несмотря на меньшие удельные энергозатраты в трехступенчатой мельнице ударно-отражательного действия, степень механической активации клинкера в ней значительно выше по сравнению с вибрационной и шаровой мельницами. Разница в прочности образцов  $R_{сж}$ , испытываемых на сжатие, тем выше, чем больше удельная поверхность клинкера  $S_{уд}$ .

При удельной поверхности 2000  $см^2/г$  прочность образцов, изготовленных из клинкера, измельченного на мельнице ударно-отражательного действия, более чем в 2 раза выше прочности образцов, изготовленных из клинкера, разрушенного в вибрационной и шаровой мельницах.

При изменении линейной скорости рабочих органов мельницы ударно-отражательного действия от 70 до 170 м/с, при наличии ярко выраженного максимума по величине удельной поверхности, минимума прочности не замечено (рис. 4). При более высокой скорости нагружения это свидетельствует о большей величине накопленной твердым телом энергии.

Оптимальный тип измельчителя следует выбирать не только по удельным энергозатратам и стоимости мельницы, но и по величине механической активации, особенно в тех случаях, когда полученные порошки применяют в последующих технологических процессах. Из чего можно сделать вывод, что мельницы третьей группы, приведенной выше классификации, значительно эффективнее мельниц первой и второй групп.

Общепринятой характеристикой мельниц, определяющей их эффективность, является энергонапряженность, но подводимую к веществу мощность можно изменять как за счет частоты ударов, так и за счет средней энергии удара. Однако эти пути изменения энергонапряженности неэквивалентны. Так, увеличение частоты ударов изменяет временной масштаб, и эффекты в этом случае будут только количественные. Если увеличивать среднюю энергию удара, то частицы будут испытывать при ударах большие напряжения, что может стимулировать протекание новых процессов. Из чего следует, что энергонапряженность представляет собой техническую характеристику мельницы, а не физический параметр процесса обработки клинкера.

## Выводы

1. Для закрепления неустойчивых грунтов следует применять свайные фундаменты из цементогрунта, возводимые буросмесительным способом.

2. Главными недостатками лёссовых грунтов являются их просадочность и неоднородность. Устранить эти недостатки позволяет устройство цементогрунтовых свай и повышение их прочности с помощью механоактивационного способа получения вяжущего.

3. Применение способа механоактивации позволяет снизить расход цемента и добиться улучшения прочностных характеристик цементогрунтовых свай.

## Список литературы

- [1] Seregin N. An integrated way to improve the properties of soil-cement pile foundations // J. E3S Web of Conferences, 2020, no 157, p. 06006.
- [2] Seregin N.G. Feasibility for the implementation of cement piles // J. OP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, no. 953, p. 012093.
- [3] Серегин Н.Г., Исаев В.Г. Результаты исследования износостойкости конструкционных материалов // Информационно-технологический вестник, 2020. № 2 (24). С. 172–178.
- [4] Серегин Н.Г., Запруднов В.И. Определение оптимальных составов цементогрунтов при устройстве свайных фундаментов буросмесительным способом // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 5. С. 106–110. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-5-106-110.
- [5] Seregin N. Parametric Model of Cement Soil. // Technological Advancements in Construction. Lecture Notes in Civil Engineering, 2022, vol 180. Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-83917-8-43>.
- [6] Серегин Н.Г., Егоров Е.А. Основания и фундаменты зданий и сооружений. М.: Изд-во МИСИ–МГСУ, 2022. URL: <http://lib.mgsu.ru> (дата обращения 15.05.2022).
- [7] Запруднов В.И. Строительное дело и материалы. СПб.: Лань, 2022. 596 с.
- [8] Ang J.B., Fredriksson P.G. Trade, Global Policy, and the Environment: New Evidence and Issues // J. of Comparative Economics, 2018, no. 46, pp. 616–633.
- [9] Garmanov G., Urazaeva N. The paper presents design and calculation of cost effectiveness of various types of foundations on the example of the city of Vologda // Procedia Engineering, 2015, no. 117, pp. 465–475.
- [10] Aguiar dos Santos R., Rogério Esquivel E. Saturated anisotropic hydraulic conductivity of a compacted lateritic soil // J. of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, no. 10, pp. 986–991.
- [11] Lu Z., Xian S., Yao H., Fang R., She J. Influence of freeze-thaw cycles in the presence of a supplementary water supply on mechanical properties of compacted soil // Cold Regions Science and Technology, 2019, no. 157, pp. 4252.
- [12] Sakai T., Nakano M. Interpretation of the mechanical behavior of embankments having various compaction properties based on the soil skeleton structure // Soils and Foundations, 2015, no. 55, pp. 1069–1085.
- [13] Kumor L.A., Kumor M.K. Changes in mechanical parameters of soil, considering the effect of additional compaction of embankment // Transportation Research Procedia, 2016, no. 14, pp. 787–796.
- [14] Ang J.B., Fredriksson P.G. Trade, Global Policy, and the Environment: New Evidence and Issues // J. of Comparative Economics, 2018, no. 46, pp. 616–633.
- [15] Hong Z. Executive labor market segmentation: How local market density affects incentives and performance // J. of Corporate Finance, 2018, v. 50, pp 1–21.
- [16] Garmanov G., Urazaeva N. Design and Calculation of Cost Effectiveness of Various Types of Foundations in Central Russia // Procedia Engineering, 2015, v. 117, pp. 465–475.
- [17] Baril G.L., Wright J.C. Different types of moral cognition: Moral stages versus moral foundations // Personality and Individual Differences, 2012, v. 53, iss. 4, pp. 468–473.
- [18] Kong G., Cao T., Hao Y., Zhou Y., Ren L. Thermomechanical properties of an energy micro pile — raft foundation in silty clay // Underground Space, 2019, no. 6 (3), pp. 1–9.
- [19] Li J., Wang X., Guo Y., Yu X. Vertical bearing capacity of the pile foundation with restriction plate via centrifuge modelling // Ocean Engineering, 2019, v. 181, pp 109–120.
- [20] Santos R., Esquivel E. Saturated anisotropic hydraulic conductivity of a compacted lateritic soil // J. of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, v. 10, iss. 5, pp. 986–991.
- [21] Lu Z., Xian Sh., Yao H., Fang R., She J. Influence of freeze-thaw cycles in the presence of a supplementary water supply on mechanical properties of compacted soil // Cold Regions Science and Technology, 2019, v. 157, pp. 42–52.
- [22] Sakai T., Nakano M. Interpretation of the mechanical behavior of embankments having various compaction properties based on the soil skeleton structure // Soils and Foundations, 2015, v. 55, iss. 5, pp. 1069–1085.
- [23] Kumor L.A., Kumor M.K. Changes in Mechanical Parameters of Soil, Considering the Effect of Additional Compaction of Embankment // Transportation Research Procedia, 2016, v. 14, pp. 787–796.
- [24] Zhao R., Hui R., Liu L., Xie M., An L. Effects of snowfall depth on soil physical–chemical properties and soil microbial biomass in moss – dominated crusts in the Gurbantunggut Desert, Northern China // Catena, 2018, v. 169, pp. 175–182.
- [25] Zhang Q., Shao M., Jia X., Wei X. Changes in soil physical and chemical properties after short drought stress in semi-humid forests // Geoderma, 2019, v. 338, pp. 170–177.
- [26] Kante N., Kryshchuk M., Lavendels J. Charged Particle Location Modeling Based Experiment Plan Acquisition Method // Procedia Computer Science, 2017, v. 104, pp. 592–597.

- [27] Baraffe H.D., Cosson M., Bect J., Delille G., Francois B. A novel non-intrusive method using design of experiments and smooth approximation to speed up multi-period loadflows in distribution network planning // *Electric Power Systems Research*, 2018, v. 154, pp. 444–451.
- [28] Hong Y., Wang Y., Wu J., Jiao L., Chang X. Developing a mathematical modeling method for determining the potential rates of microbial ammonia oxidation and nitrite oxidation in environmental samples // *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2018, v. 133, pp. 116–123.
- [29] Jayanudin J., Fahrurrozi M., Wirawan S.K., Rochmadi R. Mathematical modeling of the red ginger oleoresin release from chitosan-based microcapsules using emulsion crosslinking method // *Engineering Science and Technology*, 2019, v. 22, iss. 2, pp. 458–467.
- [30] Stephenson C.L., Harris C.A. An assessment of dietary exposure to glyphosate using refined deterministic and probabilistic methods // *Food and Chemical Toxicology*, 2016, v. 95, pp. 28–41.

## Сведения об авторах

**Серегин Николай Григорьевич** <sup>✉</sup> — канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), SereginNG@mgsu.ru

**Запруднов Вячеслав Ильич** — д-р техн. наук, профессор ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), zaprudnov@mgu.ac.ru

Поступила в редакцию 27.09.2022.

Одобрено после рецензирования 16.11.2022.

Принята к публикации 22.11.2022.

## MECHANICAL ACTIVATION METHOD FOR OBTAINING CEMENT-GROUND PILES BINDER

N.G. Seregin<sup>1✉</sup>, V.I. Zaprudnov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Moscow State Building University (NIU MGSU), 26, Yaroslavl highway, 129337, Moscow, Russia

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

SereginNG@mgsu.ru

The physicochemical processes of grinding substances by mechanical activation method are considered. The analysis of the processes occurring in solid bodies during their mechanical processing is carried out. The main types of defects arising in the process of mechanical processing of layered silicates are described. For mechanical activation, the most common types of mills are presented, which include disintegrators and planetary mills. The principles of operation of disintegrators and planetary mills are considered in detail. Classification of mills intended for clinker grinding is given. The dependence of the specific energy consumption for clinker grinding and the strength of the samples on the type of mills is analyzed. The dependence of the specific surface of the crushed clinker and the strength of the samples on the speed of the rotor of the impact-reflective mill is investigated. Recommendations on the choice of the type of clinker grinding mills are given.

**Keywords:** drilling method, pile foundation, cement-ground piles, binder, mechanical activation method, clinker

**Suggested citation:** Seregin N.G., Zaprudnov V.I. *Mekhanoaktivatsionnyy sposob polucheniya vyazhushchego dlya ustroystva tsementogruntovykh svay* [Mechanical activation method for obtaining cement-ground piles binder]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 1, pp. 114–120. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-114-120

## References

- [1] Seregin N. An integrated way to improve the properties of soil-cement pile foundations. *J. E3S Web of Conferences*, 2020, no. 157, p. 06006.
- [2] Seregin N.G. Feasibility for the implementation of cement piles. *J. OP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, no. 953, p. 012093.
- [3] Seregin N.G., Isaev V.G. *Rezultaty issledovaniya iznosostoykosti konstruktivnykh materialov* [Results of a study of the wear resistance of structural materials]. *Informatsionno-tekhnologicheskii vestnik* [Information and Technological Bulletin], 2020, no 2 (24), pp. 172–178.
- [4] Seregin N.G., Zaprudnov V.I. *Opreделение optimal'nykh sostavov tsementogruntovykh pri ustroystve svaynykh fundamentov burosmesitel'nykh sposobom* [Determination of the optimal compositions of cement soils when arranging pile foundations using the drilling mixing method]. *Lesnoy Vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, v. 25, no 5, pp. 106–110. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-5-106-110
- [5] Seregin N. Parametric Model of Cement Soil. // *Technological Advancements in Construction. Lecture Notes in Civil Engineering*, 2022, v. 180. Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-83917-8-43>.
- [6] Seregin N.G., Egorov E.A. *Osnovaniya i fundamenty zdaniy i sooruzheniy* [Bases and foundations of buildings and structures]. Moscow: MISI-MGSU. Available at: <http://lib.mgsu.ru> (accessed 15.05.2022).

- [7] Zaprudnov V.I. *Stroitel'noe delo i materialy* [Construction business and materials]. St. Petersburg: Lan', 2022, 596 p.
- [8] Ang J.B., Fredriksson P.G. Trade, Global Policy and the Environment: New Evidence and Issues. *J. of Comparative Economics*, 2018, no. 46, pp. 616–633.
- [9] Garmanov G., Urazaeva N. The paper presents design and calculation of cost effectiveness of various types of foundations on the example of the city of Vologda. *Procedia Engineering*, 2015, no. 117, pp. 465–475.
- [10] Aguiar dos Santos R., Rogério Esquivel E. Saturated anisotropic hydraulic conductivity of a compacted lateritic soil. *J. of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2018, no. 10, pp. 986–991.
- [11] Lu Z., Xian S., Yao H., Fang R., She J. Influence of freeze-thaw cycles in the presence of a supplementary water supply on mechanical properties of compacted soil. *Cold Regions Science and Technology*, 2019, no. 157, pp. 4252.
- [12] Sakai T., Nakano M. Interpretation of the mechanical behavior of embankments having various compaction properties based on the soil skeleton structure. *Soils and Foundations*, 2015, no. 55, pp. 1069–1085.
- [13] Kumor L.A., Kumor M.K. Changes in mechanical parameters of soil, considering the effect of additional compaction of embankment. *Transportation Research Procedia*, 2016, no. 14, pp. 787–796.
- [14] Ang J.B., Fredriksson P.G. Trade, Global Policy, and the Environment: New Evidence and Issues. *J. of Comparative Economics*, 2018, no. 46, pp. 616–633.
- [15] Hong Z. Executive labor market segmentation: How local market density affects incentives and performance. *J. of Corporate Finance*, 2018, v. 50, pp. 1–21.
- [16] Garmanov G., Urazaeva N. Design and Calculation of Cost Effectiveness of Various Types of Foundations in Central Russia. *Procedia Engineering*, 2015, v. 117, pp. 465–475.
- [17] Baril G.L., Wright J.C. Different types of moral cognition: Moral stages versus moral foundations. *Personality and Individual Differences*, 2012, v. 53, iss. 4, pp. 468–473.
- [18] Kong G., Cao T., Hao Y., Zhou Y., Ren L. Thermomechanical properties of an energy micro pile — raft foundation in silty clay. *Underground Space*, 2019, no. 6 (3), pp. 1–9.
- [19] Li J., Wang X., Guo Y., Yu X. Vertical bearing capacity of the pile foundation with restriction plate via centrifuge modelling. *Ocean Engineering*, 2019, v. 181, pp. 109–120.
- [20] Santos R., Esquivel E. Saturated anisotropic hydraulic conductivity of a compacted lateritic soil. *J. of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2018, v. 10, iss. 5, pp. 986–991.
- [21] Lu Z., Xian Sh., Yao H., Fang R., She J. Influence of freeze-thaw cycles in the presence of a supplementary water supply on mechanical properties of compacted soil. *Cold Regions Science and Technology*, 2019, v. 157, pp. 42–52.
- [22] Sakai T., Nakano M. Interpretation of the mechanical behavior of embankments having various compaction properties based on the soil skeleton structure. *Soils and Foundations*, 2015, v. 55, iss. 5, pp. 1069–1085.
- [23] Kumor L.A., Kumor M.K. Changes in Mechanical Parameters of Soil, Considering the Effect of Additional Compaction of Embankment. *Transportation Research Procedia*, 2016, v. 14, pp. 787–796.
- [24] Zhao R., Hui R., Liu L., Xie M., An L. Effects of snowfall depth on soil physical–chemical properties and soil microbial biomass in moss – dominated crusts in the Gurbantunggut Desert, Northern China. *Catena*, 2018, v. 169, pp. 175–182.
- [25] Zhang Q., Shao M., Jia X., Wei X. Changes in soil physical and chemical properties after short drought stress in semi-humid forests. *Geoderma*, 2019, v. 338, pp. 170–177.
- [26] Kante N., Kryshchuk M., Lavendels J. Charged Particle Location Modeling Based Experiment Plan Acquisition Method. *Procedia Computer Science*, 2017, v. 104, pp. 592–597.
- [27] Baraffe H.D., Cosson M., Bect J., Delille G., Francois B. A novel non-intrusive method using design of experiments and smooth approximation to speed up multi-period load-flows in distribution network planning. *Electric Power Systems Research*, 2018, v. 154, pp. 444–451.
- [28] Hong Y., Wang Y., Wu J., Jiao L., Chang X. Developing a mathematical modeling method for determining the potential rates of microbial ammonia oxidation and nitrite oxidation in environmental samples. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2018, v. 133, pp. 116–123.
- [29] Jayanudin J., Fahrurrozi M., Wirawan S.K., Rochmadi R. Mathematical modeling of the red ginger oleoresin release from chitosan-based microcapsules using emulsion crosslinking method. *Engineering Science and Technology*, 2019, v. 22, iss. 2, pp. 458–467.
- [30] Stephenson C.L., Harris C.A. An assessment of dietary exposure to glyphosate using refined deterministic and probabilistic methods. *Food and Chemical Toxicology*, 2016, v. 95, pp. 28–41.

## Authors' information

**Seregin Nikolay Grigor'yevich** <sup>✉</sup> — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Moscow State Building University (NIU MGSU), SereginNG@mgsu.ru

**Zaprudnov Vyacheslav Il'ich** — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), zaprudnov@mgu.ac.ru

Received 27.09.2022.

Approved after review 16.11.2022.

Accepted for publication 22.11.2022.

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

## РАЗРАБОТКА ФИЛЬТРУЮЩЕ-СОРБИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ В ЦЕЛЯХ ФОРМИРОВАНИЯ АССОРТИМЕНТА СОВРЕМЕННЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ПРОТИВОГАЗОВ И РЕСПИРАТОРОВ

М.В. Талипова<sup>1</sup>✉, А.В. Лянг<sup>1</sup>, Н.В. Щербак<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «Сорбент», 614042, Россия, Пермский край, г. Пермь, ул. Гальперина, д. 6

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

talipova@sorbent.su

Рассмотрены особенности исследования фильтрующе-сорбирующих материалов (ФСМ) для разработки малогабаритных фильтров и формирования ассортимента современных фильтров для противогазов и респираторов. В малогабаритных фильтрах опробовано и оценено сочетание фильтрующего материала с активным углем, импрегнированным химическими добавками. Определены необходимые физико-химические и сорбционные параметры адсорбентов: активного угля и активного угля, импрегнированного химическими добавками, что позволяет обеспечивать дополнительную защиту от неорганических и кислых газов и паров, от аммиака. Выявлено, что сочетание фильтрующего материала и адсорбента с малой высотой слоя обладает аналогичными зависимостями в сравнении с используемыми в промышленности противогазовыми и комбинированными малогабаритными фильтрами для противогазов и респираторов, снаряженными адсорбентами с большой высотой слоя шихты. Систематизированы и изучены способы сочетания фильтрующих материалов и адсорбентов как предпосылка для создания нового класса облегченных противоаэрозольных средств индивидуальной защиты органов дыхания — противогазов и респираторов с дополнительной защитой от газов и паров с последующей стандартизацией требований к таким средствам защиты и малогабаритных фильтров к ним. Практическая ценность работы сводится к разработке облегченных, комбинированных малогабаритных фильтров с защитой от низких концентраций вредных газов и паров, что позволит работникам предприятий использовать наиболее эргономичные средства защиты органов дыхания на производственных участках с низкими концентрациями в воздухе вредных веществ. Статья может быть рекомендована научным сотрудникам, занимающимся исследованиями в области сорбции вредных газов и паров, а так же специалистам, занимающимся разработкой перспективных и современных средств защиты органов дыхания и специалистам, имеющим отношение к охране труда на производстве.

**Ключевые слова:** адсорбенты, активный уголь, противоаэрозольные фильтры, средства защиты органов дыхания, фильтрующе-сорбирующие материалы

**Ссылка для цитирования:** Талипова М.В., Лянг А.В., Щербак Н.В. Разработка фильтрующе-сорбирующих материалов в целях формирования ассортимента современных фильтров для противогазов и респираторов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 1. С. 121–133. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-121-133

Развитие техники и интенсивный рост промышленности способствуют значительному ухудшению экологии окружающей среды. В связи с этим ужесточаются требования к средствам защиты человека от воздействия вредных техногенных факторов, в том числе и к средствам индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД) [1].

Объем рынка фильтровальных материалов будет все более увеличиваться, поскольку ожидается активный рост спроса на воздушные фильтры со стороны химической, оборонной и других отраслей промышленности [2].

Фильтры СИЗОД классифицируют на противогазовые, комбинированные [3] и противоаэрозольные [4]. При изготовлении противогазовых фильтров для формирования шихты используют углеродные сыпучие адсорбенты. Фильтры имеют

защиту от вредных газов и паров различных концентраций. Противоаэрозольные фильтры изготавливают из фильтровального материала, в том числе стекловолокнистого материала в гофрированном виде. Фильтры защищают от аэрозолей (пыли, дыма, тумана) [5]. Комбинированные фильтры представляют собой ступенчатую комбинацию углеродной шихты и фильтровальных материалов, защищают комплексно как от вредных газов и паров различных концентраций, так и от аэрозолей.

В качестве частиц адсорбента в противогазовых и комбинированных фильтрах, способных поглощать вредные газы и пары, используется микропористый активный уголь или поглотители на его основе [6].

Недостатками противогазовых и комбинированных фильтров признаны их большие габариты, большая масса и недостаточно низкое сопро-

тивление дыханию [7]. Для достижения низкого сопротивления дыханию необходим фильтр, не подверженный преждевременному засорению и требующий минимальных энергозатрат. Чем меньше сопротивление прохождению воздушного потока, тем легче дышать через фильтрующий материал и тем комфортнее СИЗОД.

Повышенное внимание к проблеме обеспечения персонала высокоэффективными и одновременно облегченными СИЗОД связано в первую очередь с улучшением условий труда на производственных предприятиях. Как показывает практика, отсутствие, в частности на судостроительных и металлургических предприятиях участков с высокой концентрацией вредных веществ, вызывает необходимость применения противоаэрозольных фильтров, что не всегда эффективно для защиты персонала по причине наличия в воздушной среде их рабочих зон низких концентраций вредных веществ, а также их кумулятивного воздействия на организм. Обеспечение работника неэргономичным СИЗОД (большого габарита, с высоким сопротивлением дыханию и защитой от вредных веществ с концентрациями, большими, чем на рассматриваемых участках некоторых предприятий) оказывает существенную дополнительную нагрузку на организм человека и снижает его работоспособность [8], ухудшает здоровье персонала.

Исходя из совокупности перечисленных факторов была поставлена задача разработки такого материала, который бы позволил создать СИЗОД, обладающие защитой как от аэрозолей, так и от вредных газов и паров низких концентраций.

Актуальность исследования подтверждает изучение сочетания противоаэрозольных материалов с адсорбентами, способного осуществлять фильтрацию аэрозолей и поглощать вредные газы и пары. Особый интерес представляет стекловолокнистый материал, подверженный гофрированию для увеличения большей площади фильтрации и заключенный в закрытый корпус фильтра в целях защиты от влаги и механических повреждений.

В работе [9] рассматривается разработка специальной одежды, обеспечивающей защиту кожных покровов людей от химических воздействий, образующихся в результате террористических актов и техногенных аварий на основе угленаполненной целлюлозы.

## Цель работы

Цель работы — разработка малогабаритных легких фильтров (МЛФ) СИЗОД, обладающих низким сопротивлением дыханию, высоким уровнем защиты от аэрозолей, а также эффективной защитой от газов и паров при их невысокой концентрации [10].

## Методология и результаты

Для достижения поставленной цели было изучено влияние сочетания адсорбента и волокнистого полуфабриката на свойства фильтрующе-сорбирующих материалов (ФСМ), определено оптимальное соотношение волокнистого полуфабриката и адсорбента, установлена степень влияния химических добавок, импрегнируемых на поверхность пор активного угля, на сорбционные свойства адсорбента.

Первостепенное значение при этом имели исследования, направленные непосредственно на определение оптимального способа нанесения адсорбента на волокнистый полуфабрикат — полимерные или стеклянные волокна.

Согласно нашим исследованиям [11], ФСМ могут быть изготовлены с помощью следующих способов:

- ламинирования расплава частиц активного угля и фильтрующего материала (ФМ) на основе стеклянных волокон;
- нанесения частиц адсорбента на подложку из ФМ на основе полипропиленовых волокон (ППВ);
- импрегнирования угля в массу ППВ методом раздува ультратонких волокон.

Способ ламинирования расплава частиц активного угля с ФМ осуществляется с помощью каландровых валов. Возможно ламинирование мелкодисперсной пыли с использованием расплава из синтетических волокон в качестве связующего и ламинирование более крупных частиц активного угля, в котором связующим между частицами активного угля и подложкой из ФМ выступает расплав клея. В случае ламинирования мелкодисперсной пыли частицы представляют собой смешанную массу мелкодисперсной пыли с волокнами вискозы или полиэстера. Под воздействием температуры происходят расплав синтетических волокон и фиксация угольной пыли на ФМ за счет термоскрепления. В случае ламинирования более крупных частиц активного угля угольная масса с клеем наносится на подложку ФМ из стеклянных волокон (СТВ) и накрывается верхним полотном. Рулонный материал перемещается к каландрам, в которых происходит окончательная фиксация верхнего и нижнего полотна с клеевой угольной массой.

Способ нанесения частиц адсорбента на подложку из фильтрующего ППВ осуществляется при пропускании материала через валы каландра. Масса активного угля наносится на подложку ФМ и накрывается верхним аналогичным полотном. Рулонный материал перемещается к каландрам, в которых в процессе термоскрепления происходит окончательная фиксация верхнего и нижнего полотна с угольной массой за счет расплавленных ППВ.

Способ импрегнирования активного угля в волокнистую массу полипропилена осуществляется методом раздува ультратонких ППВ, способных фиксировать активный уголь в полотно благодаря переплетению волокон. Этот способ позволяет получать объемные ФСМ.

Каждый вид ФСМ, полученный одним из способов, оценен с точки зрения времени защитного действия (ВЗД) на органические вещества по методике МИ 137-05795731-2003 [12].

О расширении спектра действия сорбционной способности активированных углей вследствие импрегнирования химических добавок стало известно из некоторых источников. В частности, в 1984 г. авторы работы [13] Хартмут Кинле и Эрих Бадер писали: «В целях пропитки активированных углей используются обычно гидроксид и карбонат калия в количестве 0,1...5,0 %. Кроме них можно в малых количествах применять гидроксид натрия, соли щелочных и щелочноземельных металлов, а также хлориды, сульфиды, ацетаты, карбонаты, сульфиты и многие кислоты. Эти вещества можно добавлять в растворы или при непосредственном, смешивании с тонкодисперсным материалом. При исследовании каталитического действия карбоната калия установлено, что калий внедряется между плоскостями кристаллической углеродной решетки и увеличивает расстояние между плоскостями решетки графита от 0,34 до 0,38 нм. «Вскрытые» углеродные слои в таком случае становятся доступными для дальнейшего газового активирования» [13, с. 41].

При получении углей для противогазов и других углей специального назначения, которые должны обладать высокими прочностными свойствами и большим объемом тонких пор, используется скорлупа кокосового ореха [13].

Микропоры (тонкие поры) — наиболее мелкая разновидность пор адсорбентов (менее 0,6...0,7 нм), по своим линейным размерам они соизмеримы с размерами адсорбируемых молекул. Вследствие наложения адсорбционных потенциалов противоположных стенок энергия адсорбции в микропорах существенно повышена по сравнению с непористым адсорбентом одинаковой химической природы. При адсорбции газов и паров происходит объемное заполнение микропор [14].

На основании анализа особенностей пористой структуры и природы поверхности активного угля показано, что угли — носители импрегнирующих, в том числе каталитических, добавок и должны обладать определенным объемом сорбирующих пор и распределять их по размерам в сочетании с наличием поверхностных групп, обуславливающих высокую поглощающую способность угля по воде в области низких концентраций (до 0,5 P/Ps). Наиболее эффективная угольная основа химических поглотителей — активный уголь

из химически обработанной скорлупы ореха. Она обладает необходимым объемом адсорбирующих пор и требуемой поглощающей способностью по органическим парам и воде, а также имеет щелочной характер поверхности [15].

Именно активный уголь с подобными сорбционными характеристиками был использован нами при получении ФСМ.

По данным работы [16] и согласно имеющемуся опыту разработки угольной шихты в противогазовых фильтрах с защитой от различных газов и паров вредных веществ в высоких концентрациях [17–19], представлялась возможность разработки ФСМ с дополнительной защитой от газов и паров вредных веществ низких концентраций.

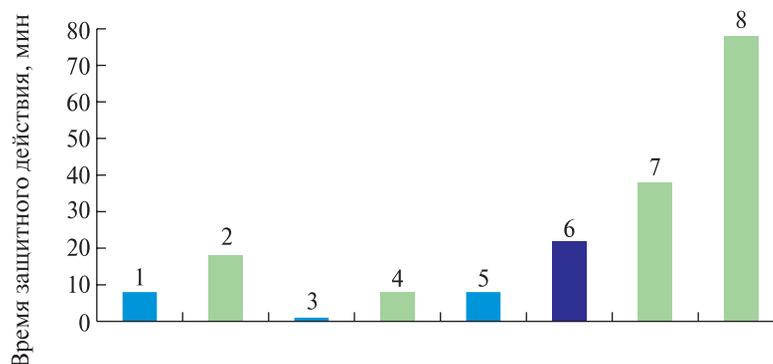
Таким образом, был разработан и внедрен адсорбент на основе активного угля, имеющий дополнительную химическую добавку в виде карбоната калия [17], который был включен в современные комбинированные фильтры большого габарита, соответствующие требованиям ГОСТ 12.4.235–2019 и ГОСТ 12.4.122–2020 [4, 20].

Наиболее оптимальное содержание карбоната калия на поверхности пор активного угля для противогазовых фильтров было достигнуто нами и составило от 9 до 17 % (массовая доля) [21].

На основании материалов работы [16] и перечисленных выше изобретений нами разработаны ФСМ с импрегнированием поглотителя в волокнистую массу ППВ. На некоторые образцы активного угля нанесены химические добавки, позволяющие получать материал как с комплексной защитой от различных газов и паров вредных веществ, так и с дифференцированной защитой от определенных газов и паров.

Использование карбоната калия в ФСМ для облегченных фильтрующих полумасок было опробовано нами в 2002 г. и подтверждено патентом [22]. Поглотитель для облегченных респираторов содержит активированную углеродную ткань, импрегнированную карбонатом калия и/или карбонатом натрия в количестве 1...10 % (массовая доля), обладает высокой динамической активностью по отношению к органическим парам и кислотным газам и парам при невысокой их концентрации в воздухе — до 5 норм предельно-допустимых концентраций (ПДК).

Дифференцированную защиту ФСМ от аммиака и его органических соединений (защита АК) получали посредством пропитки микропористого активного угля раствором хлорида никеля аналогично получению шихты противогазовой коробки (фильтра) СИЗОД для защиты от аммиака [23] до содержания 18...25 % (массовая доля), как в поглотителе ХПА-Н [16], предназначенном для снаряжения противогазовых коробок (фильтров) СИЗОД.



**Рис. 1.** Время защитного действия фильтрующе-сорбирующих материалов: 1 — АЕ на подложке ств; 2 — АЕ в объеме пп; 3 — АВЕК на подложке ств; 4 — АВЕК в объеме пп; 5 — уголь 40:80 на подложке ств; 6 — уголь 40:80 на подложке пп; 7 — уголь 40:80 в объеме пп; 8 — уголь 30:70 в объеме пп

**Fig. 1.** Time of the protective action of filtering-sorbing materials: 1 — AE on the STV substrate; 2 — AE; 3 — AVEK on the STV substrate; 4 — AVEK; 5 — coal 40:80 on a STV substrate; 6 — coal 40:80 on a pp substrate; 7 — coal 40:80; 8 — coal 30:70

Учитывая достигнутый эффект совместного применения соединений меди и хлорида никеля в различных частях адсорбента на основе активного угля [18] в шихте противогазовой коробки [19], а также последовательность нанесения на поры активного угля при изготовлении катализатора-поглотителя К-ПА (ТУ 2165-030-05795731-00) [24] сначала соединений меди 4,5...7,5 % (массовая доля) в пересчете на медь и хрома 1,2...2,2 % (массовая доля), затем хлорида никеля 7,0...15,0 % по данным работы [16], было принято решение при создании ФСМ для защиты от неорганических и кислых газов и паров, от аммиака (защита марки АВЕК) импрегнировать микропористый активный уголь вначале соединениями меди, затем — хлоридом никеля.

ФСМ со следующими наименованиями представлены на рис. 1:

1 — АЕ на подложке ств — активный уголь фракционного состава 40:80 mesh, импрегнированный химической добавкой (по [21]) в целях получения дополнительной защиты от неорганических и кислых газов и паров, получен методом ламинирования поглотителя и фильтрующего материала на основе стеклянных волокон;

2 — АЕ в объеме пп — активный уголь фракционного состава 40:80 mesh, импрегнированный химической добавкой (по [21]) в целях получения дополнительной защиты от неорганических и кислых газов и паров, получен методом раздува ультратонких ППВ с импрегнированием поглотителя в волокнистую массу;

3 — АВЕК на подложке ств — активный уголь фракционного состава 40:80 mesh, импрегнированный специальными химическими добавками в целях получения дополнительной защиты от

неорганических и кислых газов и паров, аммиака, получен методом ламинирования поглотителя и фильтрующего материала на основе стеклянных волокон;

4 — АВЕК в объеме пп — активный уголь фракционного состава 40:80 mesh, импрегнированный специальными химическими добавками в целях получения дополнительной защиты от неорганических и кислых газов и паров, аммиака, получен методом раздува ультратонких ППВ с импрегнированием поглотителя в волокнистую массу;

5 — уголь 40:80 на подложке ств — получен ламинированием частиц угля и фильтрующего материала на основе стекловолна;

6 — уголь 40:80 на подложке пп — на фильтрующий материал на основе ППВ нанесен активный уголь с фракционным составом 40:80 mesh;

7 — уголь 40:80 в объеме пп — получен методом раздува ультратонких ППВ с импрегнированием частиц активного угля с фракционным составом 40:80 mesh;

8 — уголь 30:70 в объеме пп — получен методом раздува ультратонких ППВ с импрегнированием частиц активного угля с фракционным составом 30:70 mesh.

Исследования ФСМ проходили при одинаковом удельном потоке паровоздушной смеси — 0,15 дм<sup>3</sup>/мин, смоделированном для планируемых фильтров, площади испытуемых образцов 50 см<sup>2</sup> и одинаковой концентрации заданного тест-вещества (циклогексан — 0,2 мг/дм<sup>3</sup>).

На рис. 1 видно, что защиту от органических газов и паров имеют все ФСМ. Наиболее высокое ВЗД наблюдается у ФСМ, полученных методом раздува ультратонких ППВ (объемные ФСМ).

Данный факт можно объяснить тем, что в объемных ФСМ, имеющих большую высоту слоя по сравнению с остальными ФСМ, действуют принципы, аналогичные противогазовым фильтрам — это повышение ВЗД с увеличением высоты слоя. В то же время в ФСМ образуется турбулентность потока, увеличивающая интенсивность массообмена с частицами адсорбента. Также можно предположить, что положительно на увеличение ВЗД сказывается отсутствие клея на поверхности частиц адсорбента.

Нанесение химических ингредиентов на поверхность пор активного угля, вероятно, препятствует подходу органического вещества, в частности циклогексана, к сорбирующим порам. Вследствие этого ВЗД по органическим веществам ФСМ с импрегнированным активным углем значительно ниже, чем с неимпрегнированным.

По результатам анализа ФСМ установлено, что преимуществом ламинирования является отсутствие осыпания частиц адсорбента, а также его низкая увлажняемость вследствие защиты полимерной или клеевой пленкой, недостатком — снижение защитных свойств вследствие обволакивания активного угля пленкой и необходимость подбора оптимального температурного режима и скорости вращения валов для сохранения прочности ФМ и обеспечения оптимального нагрева для расплава синтетических волокон или клея при сохранении сорбционных свойств активного угля.

Нанесение частиц активного угля на подложку из ФМ, по-нашему мнению, напротив, способствует более высоким значениям защитных показателей, но ведет к возможности осыпания частиц.

Способ импрегнирования адсорбента в ультратонкие ППВ позволяет достигать достаточно высоких показателей по ВЗД предположительно благодаря объемной структуре ФСМ, а именно созданию локальных воздушных зон высокой турбулентности вокруг частиц активного угля. Использование поглотителей в ФСМ позволяет обеспечивать дополнительную защиту от неорганических и кислых газов и паров, аммиака и способствует формированию линейки современных фильтров. Недостатком данного способа является высокая степень осыпания частиц, что при производстве фильтров требует применения дополнительного слоя ФМ, способного удерживать осыпавшиеся частицы активного угля [10].

Наиболее лучшие результаты по ВЗД объемных ФСМ позволили решить одновременно несколько поставленных ранее задач путем исследования объемных ФСМ.

Испытаниям подверглись следующие образцы ФСМ:

– уголь 30:70 — с импрегнированием ППВ частицами активного угля фракционного состава 30:70 mesh;

– уголь 40:80 и уголь 40:80/2 — с импрегнированием ППВ частицами активного угля фракционного состава 40:80 mesh;

– АЕ и АЕ/2 — с импрегнированием ППВ поглотителем, с дополнительной защитой от неорганических и кислых газов и паров;

– АВЕК и АВЕК/2 — с импрегнированием ППВ поглотителем с дополнительной защитой от неорганических и кислых газов и паров, аммиака;

– АК — с импрегнированием ППВ поглотителем с дополнительной защитой от аммиака.

В образцах уголь 40:80/2, АЕ/2, АВЕК/2 в ППВ добавлен активный уголь или поглотитель, меньше по количеству в 2 раза, чем в образцах уголь 40:80, АЕ и АВЕК соответственно.

На основании результатов, полученных при испытании ФСМ на ВЗД по парам органических веществ, кислым газам и парам, неорганическим газам и парам, аммиаку оценивали ФСМ. В качестве тест-вещества использовали следующие вещества (МИ 137-05795731–2003, ГОСТ 12.4.159–90) [12, 25]:

– по парам органических веществ — циклогексан в концентрации 0,2 мг/дм<sup>3</sup> и 0,4 мг/дм<sup>3</sup>;

– по кислым газам и парам — диоксид серы с концентрацией 0,2 мг/дм<sup>3</sup>;

– по неорганическим газам и парам — сероводород с концентрацией 0,2 мг/дм<sup>3</sup>;

– по аммиаку — аммиак с концентрацией 0,2 мг/дм<sup>3</sup>.

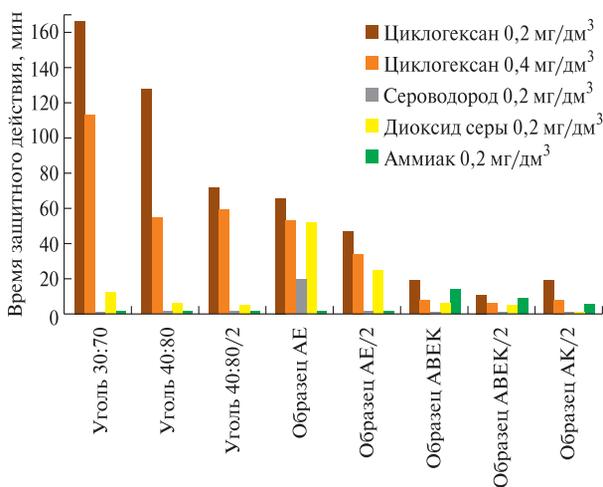


Рис. 2. Время защитного действия фильтрующе-сорбирующих материалов на основе полипропиленовых волокон

Fig. 2. Time of protective action of filter-sorbing materials based on polypropylene fibers

Исследования ФСМ (рис. 2), проходили при одинаковом удельном потоке паровоздушной смеси — 0,1 дм<sup>3</sup>/мин, смоделированном для планируемых фильтров, при площади испытываемых образцов 50 см<sup>2</sup> и одинаковой концентрации заданного тест-вещества.

## Характеристики фильтрующе-сорбирующих материалов

## Characteristics of filter-sorbing materials

Параметр	Образец АЕ	Образец АЕ/2	Образец АВЕК	Образец АВЕК/2	Уголь 30:70	Уголь 40:80	Уголь 40:80/2	Образец АК/2
Толщина, мм	1,28; 1,40	0,77; 0,92	1,37; 1,45	0,77; 0,93	1,44; 1,62	1,47; 1,59	0,69; 0,80	0,75; 0,96
Массовая доля влаги, %	4,7	4,9	3,8	5,0	1,4	1,1	1,5	5,9
Предельный объем сорбционного пространства по парам бензола, см <sup>3</sup> /г	0,37	0,33	0,24	0,30	0,55	0,41	0,43	0,29
Сопrotивление постоянному потоку воздуха при 15,0 дм <sup>3</sup> /мин, мм вод. ст.	1,8	1,5	2,2	1,5	1,5	1,8	0,9	1,4
Сопrotивление постоянному потоку воздуха при 47,5 дм <sup>3</sup> /мин, мм вод. ст.	2,7	2,6	3,1	2,6	2,6	2,7	1,8	2,7
Поверхностная плотность, г/м <sup>2</sup>	336	176	360	187	323	325	142	182

Пропитка активного угля специальными добавками позволяет обеспечивать дополнительную защиту от неорганических и кислых газов и паров, от аммиака (см. рис. 2). Пропитка активного угля в целях защиты от неорганических и кислых газов и паров осуществлялась карбонатом калия, по данным работы [21]. В ходе предварительных экспериментов с адсорбентами установлено, что содержание карбоната калия в поглотителе на основе активного угля из химически обработанной скорлупы ореха более 17,0 % (массовая доля) приводит к снижению динамической активности поглотителя по диоксиду серы, а при содержании карбоната калия 23,0 и 25,0 % (массовая доля) динамическая активность поглотителя по диоксиду серы снижается более чем в 2 раза. Очевидно, этот факт связан с блокированием большим содержанием карбоната калия адсорбирующих пор в поглотителе, что, вероятно, препятствует доступу диоксида серы в реакционное пространство поглотителя [16].

Пропитка активным углем в целях защиты от неорганических и кислых газов и паров, аммиака основывалась на предварительных результатах, приведенных в работах [18, 19, 21], и на принятом решении последовательного импрегнирования активного угля соединениями меди и хлоридом никеля для защиты образца АВЕК, и только хлоридом никеля для защиты образца АК.

Все образцы ФСМ обладают способностью поглощать пары органических веществ (тест-вещество — циклогексан в концентрации 0,2 мг/дм<sup>3</sup> и 0,4 мг/дм<sup>3</sup>). Это так же, как и в предыдущих экспериментах (см. рис. 1), объясняется нами тем, что все поглотители выполнены на основе микропористого активного угля. При этом нане-

сение химических ингредиентов на поверхность пор активного угля препятствует подходу органического вещества, в частности циклогексана, к сорбирующим порам. Вследствие этого ВЗД по циклогексану ФСМ с поглотителями значительно ниже, чем время защитного действия ФСМ, изготовленных из чистого активного угля.

В табл. 1 представлены результаты испытаний по показателям, на которые также оказывают влияние химические добавки, импрегнируемые на поверхность пор активного угля, на сорбционные свойства поглотителей ГОСТ 29104.1–91, ГОСТ 27015–6, ТУ ВУ 40001289.108–2009, ГОСТ 12.4.235–2019 [4, 26–29]:

- поверхностная плотность, г/м<sup>2</sup>;
- толщина, мм;
- массовая доля влаги, %;
- предельный объем сорбционного пространства по парам бензола, см<sup>3</sup>/г;
- сопротивление постоянному потоку воздуха ФСМ при объемном расходе воздушного потока 15,0 л/мин;
- сопротивление постоянному потоку воздуха ФСМ при объемном расходе воздушного потока 47,5 л/мин.

Как видно из табл. 1, образец уголь 40:80/2 имеет наиболее низкое значение поверхностной плотности и невысокое сопротивление воздушному потоку. Поверхностная плотность образцов с меньшим количеством адсорбента (110 + 10) г/м<sup>2</sup> значительно ниже поверхностной плотности образца уголь 40:80 с количеством адсорбента (220 + 10) г/м<sup>2</sup>. Результаты по сопротивлению ФСМ с одним и тем же адсорбентом при разных потоках расхода воздуха (15,0 и 47,5 дм<sup>3</sup>/мин) коррелируют между собой.

Фильтрующе-сорбирующий материал, изготовленный импрегнированием активного угля 30:70 в ППВ имеет наиболее высокие значения ВЗД от органических веществ и защиты от кислых газов и паров в течение 12 мин (см. рис. 2), при этом обладает невысокой защитой от сероводорода в концентрации 0,2 мг/дм<sup>3</sup>. Испытания по защите от аммиака на данном образце не проводились. Необходимо отметить, что образец ФСМ отличается от других свойствами используемого активного угля. Данный образец уголь 30:70 наиболее микропористый, имеет самый высокий предельный объем сорбционного пространства (см. табл. 1) и обладает статической активностью по четыреххлористому углероду в динамических условиях (сорбционной емкостью (СТС)) более 100 %, что проявляется в самых высоких результатах по ВЗД от органических веществ. Уголь 40:80 обладает активностью по четыреххлористому углероду СТС 85 %.

Образцы уголь 30:70, уголь 40:80, уголь 40:80/2 изготовлены из скорлупы кокосового ореха и имеют щелочной характер (соединения карбоната калия и гидроксида калия), за счет чего способны в определенной степени к хемосорбции кислых газов и паров. Поэтому они могут иметь ВЗД по диоксиду серы при 0,2 мг/дм<sup>3</sup> по химической реакции образования сульфата калия. Что касается поглощения сероводорода, то очевидно, что имеющегося количества щелочной добавки недостаточно для концентрации сероводорода 0,2 мг/дм<sup>3</sup>.

Предположительно, поглощающая способность адсорбентов в ФСМ по сероводороду зависит от объема мезопор в активном угле. Мезопоры — более крупные поры, для которых характерно послойное заполнение поверхности адсорбируемыми молекулами, завершающееся при более высоких равновесных относительных давлениях адсорбата их объемным заполнением по механизму капиллярной конденсации. Удельная поверхность мезопор может достигать 100...200 м<sup>2</sup>/г [14].

Объем мезопор в активном угле 40×80, меньше, чем объем микро- и макропор, см<sup>3</sup>/г:

- микропоры — 0,502;
- мезопоры — 0,098;
- макропоры — 0,2.

Судя по сравнительно небольшому объему мезопор, значительно заполненных в большом количестве химическими добавками, можно предположить, что для проведения химических процессов с сероводородом недостаточно времени и пространства для прохождения реакции.

Привлекает внимание в аспекте проблематики нашего исследования работы высота слоя ФСМ, что наглядно проиллюстрировано на рис. 3. На рис. 3 представлено ВЗД у образцов АЕ и

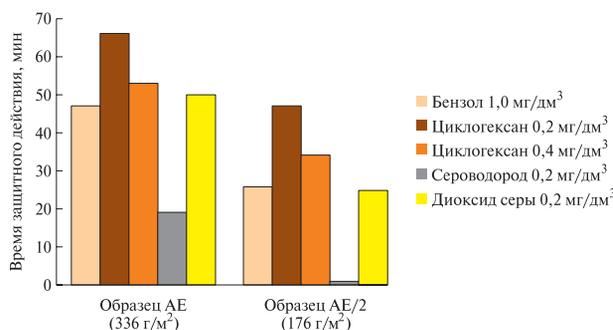


Рис. 3. Время защитного действия фильтрующе-сорбирующих материалов АЕ и АЕ/2 в зависимости от высоты слоя в ФСМ

Fig. 3. The time of the protective action of the filter-sorbing materials АЕ and АЕ/2 depending on the height of the layer in the FSM

АЕ/2, отличающихся между собой количеством добавленного поглотителя в ППВ в 2 раза.

Из рис. 3 видно, что образцы АЕ и АЕ/2 имеют достаточно высокое ВЗД не только по кислым газам и парам (диоксид серы), но и по неорганическим соединениям (сероводород). При этом следует отметить, что показатель ВЗД по сероводороду для образца с меньшим количеством поглотителя и поверхностной плотностью 176 г/м<sup>2</sup> существенно снизился.

При аналогичных массовой доле влаги и предельном объеме сорбционного пространства адсорбентов (см. табл. 1) со снижением количества поглотителя в ФСМ в 2 раза наблюдается снижение ВЗД также примерно в 2 раза, что сопоставимо с линейной зависимостью ВЗД фильтров противогазов по диоксиду серы от высоты слоя поглотителя.

С увеличением высоты слоя в ФСМ время защитного действия возрастает в связи с увеличением количества активного угля и, соответственно, его мезопор, что приводит к увеличению пространства и времени протекания химических процессов. Увеличение высоты слоя при расположении частиц активного угля в хаотичном порядке на расстоянии друг от друга, как мы уже предполагали, ведет к возникновению еще большего количества зон локальной турбулентности вокруг частиц активного угля, что также должно, по нашему мнению, приводить к увеличению ВЗД.

Основной целью данной работы была разработка малогабаритных фильтров с защитой от вредных газов и паров низких концентраций. Такие фильтрующе-сорбирующие материалы, как уголь 40:80, уголь 40:80/2, образцы АЕ/2, АВЕК/2 и АК/2 опробованы в фильтрах. Получены положительные результаты.

На рис. 4 представлено сопоставление результатов по ВЗД каркасных трапецидальных малогабаритных фильтров (МЛФ), исследованных нами ранее (см. табл. 1) и время защитного

действия ФСМ по парам органических веществ (тест-вещество — циклогексан в концентрации 0,4 мг/дм<sup>3</sup>). Расход потока паровоздушной смеси у МЛФ 15 дм<sup>3</sup>/мин, у ФСМ — 4,90 дм<sup>3</sup>/мин при площади образца 50 см<sup>2</sup>.

Из рис. 4 видно, что результаты исследования ФСМ уголь 40:80 и образцов АВЕК/2, АЕ/2 и АК/2 находятся на сопоставимом уровне с МЛФ, изготовленными из этих ФСМ, что говорит о правильности поставленных экспериментов и проведенных испытаний по ВЗД.

В табл. 2 представлены результаты испытаний МЛФ, изготовленных из образцов исследуемых ФСМ, которые характеризуют их фильтрующие свойства [4]:

- сопротивление постоянному потоку воздуха при расходе воздуха 15 дм<sup>3</sup>/(мин·см<sup>2</sup>), мм вод. ст. [4];
- сопротивление постоянному потоку воздуха при расходе воздуха 47,5 дм<sup>3</sup>/(мин·см<sup>2</sup>), мм вод. ст.;
- проницаемость по парафиновому маслу при расходе воздуха 47,5 дм<sup>3</sup>/(мин·см<sup>2</sup>), мм вод. ст. [4];
- масса, г.

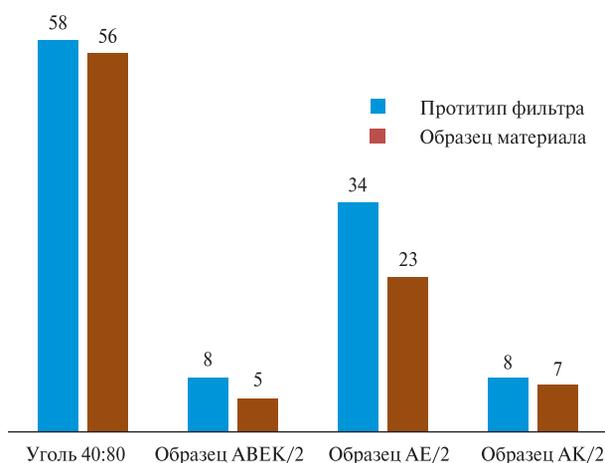


Рис. 4. Сопоставление результатов по времени защитного действия образцов фильтрующе-сорбирующих материалов и прототипа трапецидалных малогабаритных фильтров с дополнительной защитой, мин

Fig. 4. Comparison of the results in terms of the time of the protective action of samples of filter-sorbing materials and the prototype of trapezoidal small-sized filters with additional protection, min.

Т а б л и ц а 2

### Результаты испытаний малогабаритных фильтров, изготовленных на основе исследуемых ФСМ

Test results of small-sized filters made on the basis of the studied FSM

Параметр	Образец АВЕК/2	Уголь 40:80	Уголь 40:80/2	Образец АЕ/2	Образец АК/2
Проницаемость фильтра по парафиновому маслу при объемном расходе 47,5 дм <sup>3</sup> /мин, %, не более	0,001; 0,002	0,001; 0,004	0,001; 0,004	0,001; 0,002	0,001; 0,003
Сопротивление постоянному потоку воздуха при 15 дм <sup>3</sup> /мин, мм вод. ст.	4,0; 4,2	4,0; 4,2	3,6; 3,8	4,0; 4,2	4,4; 4,6
Сопротивление постоянному потоку воздуха при объемном расходе 47,5 дм <sup>3</sup> /мин, мм вод. ст.	10,3; 11,2	10,7; 11,4	9,6; 11,0	11,6; 12,0	12,2; 12,4
Масса, г	17	19	15	16	16
Время защитного действия по сероводороду при концентрации 0,2 мг/дм <sup>3</sup> , мин, не менее	1	–	1	2	–
Время защитного действия по диоксиду серы при концентрации 0,2 мг/дм <sup>3</sup> , мин, не менее	6	–	7	13	–
Время защитного действия по аммиаку при концентрации 0,2 мг/дм <sup>3</sup> , мин, не менее	6	–	–	–	13

Из представленных в табл. 2 данных следует, что проницаемость МЛФ находится на одном уровне (0,001...0,004 %) и соответствует классу РЗ [4], сопротивление МЛФ находится также на одном уровне — 4,0...4,2 мм вод. ст., сопротивление образцов МЛФ, выполненных из ФСМ уголь 40:80, с наиболее высоким значением поверхностной плотности, находится на уровне выполненных из ФСМ образцов — АВЕК/2, АЕ/2, АК/2, которые изготовлены с использованием поглотителя, в количестве меньше, чем в 2 раза. Возможно, это связано с измельчением поглотителей при их производстве (вследствие трения при пересыпании).

Малогабаритные фильтры испытаны на ВЗД по органическим, неорганическим, кислым газам и парам, а также по аммиаку.

От паров органических веществ (тест-вещество — циклогексан в концентрации 0,4 мг/дм<sup>3</sup>) защищают все исследуемые МЛФ. Отметим, что МЛФ из ФСМ уголь 40:80, имеет по ВЗД по циклогексану лучшие значения, чем МЛФ из таких ФСМ, как уголь 40:80/2, образцы АЕ/2, АК/2 и АВЕК/2.

От неорганических газов и паров защищают МЛФ из ФСМ образец АЕ/2 — ВЗД 2 мин (тест-вещество сероводород), т. е. невысоко.

От кислых газов и паров (тест-вещество — диоксид серы) защищают МЛФ из ФСМ образец

АВЕК/2, уголь 0:80/2, ВЗД на одном уровне — 6 и 7 мин. Образец АЕ/2 поглощает диоксид серы в течение 13 мин. Следует констатировать, что образец МЛФ из ФСМ уголь 40:80/2 задерживает кислые газы и пары, что подтверждают предыдущие установленные закономерности.

От аммиака защищают МЛФ из ФСМ образец АВЕК/2 и образец АК/2. Малогабаритные фильтры АК/2 имеет наиболее высокое ВЗД по аммиаку.

Таким образом, на МЛФ подтверждаются все зависимости, полученные и объясненные на образцах ФСМ, из которых изготовлены МЛФ.

У исследуемых образцов МЛФ также определялась масса. В самом легком МЛФ — уголь 40:80/2 отмечается наименьшее значение поверхностной плотности, а самый относительно тяжелый МЛФ — из ФСМ уголь 40:80, так как его материал из всех рассматриваемых МЛФ имеет наибольшее значение поверхностной плотности.

Наряду с описанными исследованиями следует отметить существенный недостаток ФСМ — при их получении проблематично (пока это не достигнуто) наносить электрический заряд на волокна полипропилена, что может привести к повышению эффективной защиты материала от аэрозолей.

Известно, что ФМ, наполненный активным углем, применяется в МЛФ в плоском или гофрированном виде. Объемные ФСМ на основе ППВ применимы только в плоских МЛФ и только в сочетании с противоаэрозольным материалом.

## Выводы

Проведенные исследования позволяют определить физико-химические и сорбционные параметры адсорбентов, а так же выявить закономерности и сорбционные процессы, происходящие в ФСМ.

Разработка ФСМ, полученных разными способами, с нанесенными химическими ингредиентами на поверхность пор активного угля позволит расширить ассортимент облегченных СИЗОД с улучшенными эргономическими свойствами.

На основании проведенных исследований является возможность создания новой линейки облегченных малогабаритных фильтров, которые приведут к защите органов дыхания от низких концентраций вредных веществ в совокупности комбинаций или дифференцированно от различного ряда вредных веществ до универсальной защиты АВЕК.

Разработка линейки малогабаритных фильтров обеспечит персоналу промышленных предприятий, работающему на участках с высокими концентрациями аэрозолей и низкими концентрациями вредных химических веществ в воздухе сохранять здоровье и жизнь.

## Список литературы

- [1] Жолобова Л.В. Технология фильтровальных видов бумаги и картона для защиты органов дыхания: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.03. Волжск, 1999. 170 с.
- [2] Коваленко В.В. Совершенствование технологии получения бумагоподобных материалов фильтровального назначения на основе стеклянных волокон: дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2014. 123 с.
- [3] ГОСТ 12.4.246–2016. Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты органов дыхания. Фильтры противоаэрозольные. Общие технические требования. М.: Стандартинформ, 2017. 25 с.
- [4] ГОСТ 12.4.235–2019. Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты органов дыхания. Фильтры противогазовые и комбинированные. Общие технические требования. Методы испытаний. Маркировка. М.: Стандартинформ, 2019. 26 с.
- [5] Грин Г.Л. Аэрозоли — пыли, дымы и туманы: пер. с англ. Х. Грин, В. Лейн / под ред. Н.А. Фукса. Л.: Химия, Ленингр. отд-ние, 1969. 426 с.
- [6] Справочник химика / под ред. Б.П. Никольского. Л.; М.: Госхимиздат, 1951–1952. Т. 3. 211 с.
- [7] Талипова М.В., Лянг А.В. Разработка фильтрующе-сорбирующих материалов для формирования ассортимента современных фильтров для противогазов и респираторов // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: Материалы VI Междунар. науч.-техн. конф., посвященной памяти профессора В.И. Комарова. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова». 2021, Архангельск, 09–11 сентября 2021 г. Архангельск: Изд-во Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова, 2021. 426 с.
- [8] Петрянов И.В., Кошечев В.С., Басманов П.И. Лепесток (Легкие респираторы). М.: Наука, 1984. 216 с.
- [9] Семочкин Н.В. Фильтрующие угленасыщенные материалы для специальной одежды, защищающие от воздействия высокотоксичных и химически опасных веществ: дис. ... канд. техн. наук: 05.19.01. Казань, 2008. 140 с.
- [10] Талипова М.В., Лянг А.В., Щербак Н.В. Сравнительный анализ фильтровальных бумаг высокой эффективности очистки воздуха для средств индивидуальной защиты органов дыхания // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2022. № 239. С. 248–263.
- [11] Талипова М.В., Лянг А.В. Перспективные способы сочетания фильтрующих и сорбирующих материалов с целью формирования ассортимента современных фильтров для противогазов и респираторов: Инновационные технологии защиты окружающей среды в современном мире // Материалы Всерос. науч. конф. с междунар. участием молодых ученых и специалистов, Казань, 18–19 марта 2021 г. Казань: Изд-во Казанского национального исследовательского технологического университета, 2021. С. 666–669.
- [12] МИ137-05795731–2003 Методика определения времени защитного действия противогазовых и комбинированных фильтров по циклогексану. Пермь: ОАО «Сорбент», 2004. 5 с.
- [13] Кинле Х., Бадер Э. Противогазовая защита // Активные угли и их промышленное применение / под ред. Т.Г. Плаченова, С.Д. Колосенцева. Л.: Химия, Ленингр. отделение, 1984. 215 с.

- [14] Мухин В.М., Чебыкин В.В., Галкин Е.А., Васильев Н.П., Медяник В.С., Тамамьян А.Н. Активные угли. Эластичные сорбенты. Катализаторы, Осушители и химические поглотители на их основе: каталог / под общей редакцией В.М. Мухина. М.: Издательский дом «Руда и металл», 2003. 280 с.
- [15] Талипова М.В., Лянг А.В. Практика применения адсорбентов для формирования ассортимента современных фильтров для противогазов и респираторов. Сообщение 3 // Физико-химические проблемы адсорбции, структуры и химии поверхности нанопористых материалов: сб. тез. докл. Всерос. конф. с междунар. участием, посвященной 120-летию со дня рождения М.М. Дубинина, Москва, 18–22 октября 2021 г. М.: Изд-во Института физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, 2021. С. 288–291.
- [16] Лянг А.В. Разработка новых химических поглотителей и фильтров СИЗОД на их основе для использования в чрезвычайных ситуациях: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2007. 277 с.
- [17] Романов Ю.А., Кузьмина Н.С., Лянг А.В., Кутумина Г.А. Адсорбент для средств защиты органов дыхания. Пат. 2154525 Российская Федерация, МПК В01J 20/20(2006.01), А62D 9/00(2006.01), В01J 20/02; заявитель и патентообладатель ЗАО «Сорбент-Центр Внедрение». № 99118475/12; заявл. 25.08.1999; опубл. 20.08.2000.
- [18] Романов Ю.А., Лянг А.В., Кузьмина Н.С., Кутумина Г.А. Адсорбент для средств защиты. Пат. 2223817 2154525 Российская Федерация, МПК В01J 20/20(2006.01), А62В 23/00(2006.01), В01J 20/02; заявитель и патентообладатель ЗАО «Сорбент-Центр Внедрение», ОАО «Сорбент». № 2003106341/15; заявл. 03.05.2003; опубл. 20.02.2004.
- [19] Романов Ю.А., Лянг А.В., Кузьмина Н.С., Кутумина Г.А. Противогазовая коробка. Пат. 2228211 Российская Федерация, МПК А62В23/02; заявитель и патентообладатель ЗАО «Сорбент-Центр Внедрение», № 2003111061/12; заявл. 17.04.2003; опубл. 10.05.2004.
- [20] ГОСТ 12.4.122–2020. Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты органов дыхания. Фильтры противогазовые и комбинированные большого габарита. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2020. 10 с.
- [21] Романов Ю.А., Лянг А.В. Адсорбент для средств индивидуальной защиты органов. Пат. 22245592 Российская Федерация, МПК В01J 20/20(2006.01), В01J 20/02; заявитель и патентообладатель ЗАО «Сорбент-Центр Внедрение». № 2002131029/15; заявл. 18.11.2002; опубл. 27.02.2004.
- [22] Романов Н.Ю., Лянг А.В., Фарберова Е.А., Кузьмина Н.С., Кутумина Г.А. Поглотитель для облегченных респираторов. Пат. 2230610 Российская Федерация, МПК В01J20/20, В01J20/02, А62В23/02; заявитель и патентообладатель ЗАО «Сорбент-Центр Внедрение». № 2002133829/15; заявл. 15.12.2002; опубл. 20.06.2004.
- [23] Олонцев В.Ф. «Российские активные угли». Пермь: Аист, 1996. 90 с.
- [24] ТУ 2165-030-05795731–00. Катализатор-поглотитель К-ПА. Пермь: ЗАО «Сорбент — Центр Внедрение», 2000. 10 с.
- [25] ГОСТ 12.4.159–90 Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты органов дыхания фильтрующие. Методы определения времени защитного действия фильтрующе-поглощающих коробок по газообразным вредным веществам. М.: Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1990. 22 с.
- [26] ГОСТ 29104.1–91. Ткани технические. Методы определения линейных размеров, линейной и поверхностной плотностей. М.: ИПК Издательство Стандартов, 2004. 7 с.
- [27] ГОСТ 27015–86. Бумага и картон. Методы определения толщины, плотности и удельного объема. М.: Государственный комитет по стандартам, 2002. 4 с.
- [28] ГОСТ 12597–67 Сорбенты. Метод определения массовой доли воды в активных углях и катализаторах на их основе. М.: ИПК Издательство Стандартов, 1988. 4 с.
- [29] ТУ ВУ 400031289.108–2009. Материалы угольно-лохностые сорбционно фильтрующие БУСОФИТ. Технические условия. Светлогорск: Республиканское унитарное предприятие «Светлогорское производственное объединение «Химволокно», 2009. 16 с.

## Сведения об авторах

**Талипова Марина Валерьевна**✉ — инженер-технолог, АО «Сорбент», talipova@sorbent.ru  
**Лянг Андрей Владимирович** — канд. техн. наук, руководитель научно-технической службы средств индивидуальной защиты (НТС СИЗ), АО «Сорбент», avl@sorbent.ru  
**Щербак Наталья Владимировна** — канд. техн. наук, зав. кафедрой целлюлозно-бумажных и лесохимических производств, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), n.sisoeva@narfu.ru

Поступила в редакцию 20.10.2022.

Одобрено после рецензирования 18.11.2022.

Принята к публикации 01.12.2022.

# DEVELOPMENT OF FILTER-SORBING MATERIALS FOR MODERN GAS MASKS AND RESPIRATORS

M.V. Talipova<sup>1</sup>✉, A.V. Lyang<sup>1</sup>, N.V. Shcherbak<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC «Sorbent», 6, Galperina st., 614042, Perm Krai, Perm, Russia

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

talipova@sorbent.su

The article focuses on the study of filter-sorbing materials (FSM) for the development of small-sized filters and the formation of a modern filters range for gas masks and respirators. There are various kinds of filters, namely particle filters, consisting of a filter material (FM) with protection from aerosols; gas filters, consisting of coal charge with protection from various concentrations of dangerous gases and vapors and combined filters, including anti-aerosol and gas protection. But in industry, due to the improvement of working conditions at enterprises, personal respiratory protection equipment is needed both from aerosols and from low concentrations of dangerous gases and vapors in the air of the working area. The creation of a new small-sized filter with a single filter-sorbing element with low resistance to air flow during breathing is an actual task. In order to form an assortment of modern filters for gas masks and respirators, we studied FSM in the form of polymer or glass fibers sprayed with carbon particles. An experimental series of studies based on the use of FSMs with adsorbents has been carried out, activated carbon (AC) and various absorbers were obtained by impregnation of AC. It is determined that the impregnation of AC with special additives allows for additional protection from inorganic and acid gases and vapors, from ammonia. Comparative tests of the FSMs were carried out with the analysis of the research results. Optimal FSMs have been determined. The fractional composition of coal particles is determined depending on the method of their application. The sorption properties of the obtained FSMs are determined. In this work, for the first time, the combination of a filter material with AC impregnated with chemical additives in particle filters was tested and evaluated. The effect of a combination of AC and a fibrous semi-finished product on the properties of FSM has been studied.

**Keywords:** adsorbents, activated carbon, filters, respiratory organs, filter-sorbing materials

**Suggested citation:** Talipova M.V., Lyang A.V., Shcherbak N.V. *Razrabotka fil'truyushche-sorbiruyushchikh materialov v tselyakh formirovaniya assortimenta sovremennykh fil'trov dlya protivogazov i respiratorov* [Development of filter-sorbing materials for modern gas masks and respirators]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 1, pp. 121–133. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-121-133

## References

- [1] Zholobova L.V. *Tekhnologiya fil'troval'nykh vidov bumagi i kartona dlya zashchity organov dykhaniya* [Technology of filtering types of paper and cardboard for respiratory protection]. *Dis. Cand. Sci. (Tech.)*, 05.21.03. Volzhsk, 1999, 170 p.
- [2] Kovalenko V.V. *Sovershenstvovanie tekhnologii polucheniya bumagopodobnykh materialov fil'troval'nogo naznacheniya na osnove steklyannykh volokon* [Improving the technology for obtaining paper-like materials for filtering purposes based on glass fibers]. *Dis. Cand. Sci. (Tech.)*. Arkhangelsk, 2014, 123 p.
- [3] GOST 12.4.246–2016 *Sistema standartov bezopasnosti truda. Sredstva individual'noy zashchity organov dykhaniya. Fil'try protivogazov i kombinirovannyye. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya* [System of labor safety standards. Personal respiratory protection. Antiaerosol filters. General technical requirements]. Moscow: Standartinform, 2017, 25 p.
- [4] GOST 12.4.235–2019 *Sistema standartov bezopasnosti truda. Sredstva individual'noy zashchity organov dykhaniya. Fil'try protivogazovye i kombinirovannyye. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya. Metody ispytaniy. Markirovka* [System of labor safety standards. Personal respiratory protection. Anti-gas and combined filters. General technical requirements. Test methods. Marking]. Moscow: Standartinform, 2019, 26 p.
- [5] Green G.L. *Aerologii — pyli, dymy i tumany* [Aerosols — dusts, smokes and fogs]. Leningrad: Chemistry. Leningrad department, 1969, 426 p.
- [6] *Spravochnik khimika* [Handbook of a chemist]. Ed. B.P. Nikolsky. Leningrad; Moscow: Goshimizdat, 1951–1952, v. 3, 211 p.
- [7] Talipova M.V., Lyang A.V. *Razrabotka fil'truyushche-sorbiruyushchikh materialov dlya formirovaniya assortimenta sovremennykh fil'trov dlya protivogazov i respiratorov* [Development of filtering-sorbing materials for the formation of an assortment of modern filters for gas masks and respirators]. *Problemy mekhaniki tsellyulozno-bumazhnykh materialov: mater. VI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy pamyati professora V.I. Komarova*. Ministerstvo nauki i vysshego obrazovaniya i Rossiyskoy Federatsii, Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Severnoy (Arkticheskiy) federal'nyy universitet imeni M.V. Lomonosova» [Problems of mechanics of pulp and paper materials: mater. VI International scientific and technical conference dedicated to the memory of Professor V.I. Komarov. Ministry of Science and Higher Education and the Russian Federation, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov»], 2021, Arkhangelsk, September 09–11, 2021 Arkhangelsk: Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 2021, 426 p.
- [8] Petryanov I.V., Koshcheev B.C., Basmanov P.I. *Lepetok (Legkie respiratory)* [Petal (Light respirators)]. Moscow: Nauka, 1984, 216 p.
- [9] Semochkin N.V. *Fil'truyushchie uglenapolnennyye materialy dlya spetsial'noy odezhdy, zashchishchayushchie ot vozdeystviya vysokotoksichnykh i khimicheskikh opasnykh veshchestv* [Filtering carbon-filled materials for special clothing, protecting against the effects of highly toxic and chemically hazardous substances]. *Dis. Cand. Sci. (Tech.)*, 05.19.01. Kazan', 2008, 140 p.

- [10] Talipova M.V., Lyang A.V., Shcherbak N.V. *Sravnitel'nyy analiz fil'troval'nykh bumag vysokoy effektivnosti ochistki vozdukh dlya sredstv individual'noy zashchity organov dykhaniya* [Comparative analysis of high-efficiency filter papers for air purification for personal respiratory protection]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Proceedings of the St. Petersburg Forestry Engineering Academy], 2022, no. 239, pp. 248–263.
- [11] Talipova M.V., Lyang A.V. *Perspektivnye sposoby sochetaniya fil'truyushchikh i sorbiruyushchikh materialov s tsel'yu formirovaniya assortimenta sovremennykh fil'trov dlya protivogazov i respiratorov* [Promising ways to combine filtering and sorbing materials in order to form an assortment of modern filters for gas masks and respirators]. *Innovatsionnye tekhnologii zashchity okruzhayushchey sredy v sovremennom mire: mater. Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem molodykh uchenykh i spetsialistov* [Innovative technologies for environmental protection in the modern world: mater. All-Russian Scientific Conference with international participation of young scientists and specialists], Kazan', March 18–19, 2021. Kazan': Kazan National Research Technological University, 2021, pp. 666–669.
- [12] MI 137-05795731–2003 *Metodika opredeleniya vremeni zashchitnogo deystviya protivogazovykh i kombinirovannykh fil'trov po tsiklogeksanu* [Method for determining the protective action time of anti-gas and combined filters by cyclohexane]. Perm': JSC «Sorbent», 2004, 5 p.
- [13] Kinle H., Bader E. *Protivogazovaya zashchita* [Gas protection]. *Aktivnye ugli i ikh promyshlennoe primenenie* [Active coals and their industrial application]. Ed. T.G. Plachenova, S.D. Kolosentsev. Leningrad: Chemistry. Leningrad Department, 1984, 215 p.
- [14] Mukhin V.M., Chebykin V.V., Galkin E.A., Vasil'ev H.P., Medyanik B.C., Tamam'yan A.N. *Aktivnye ugli. Elastichnye sorbenty. Katalizatory, Osushiteli i khimicheskie poglotiteli na ikh osnove: katalog* [Active coals. Elastic sorbents. Catalysts, Dryers and Chemical Absorbers Based on Them: Catalog]. Ed. V.M. Mukhin. Moscow: Publishing House «Ore and Metals», 2003, 280 p.
- [15] Talipova M.V., Lyang A.V. *Praktika primeneniya adsorbentov dlya formirovaniya assortimenta sovremennykh fil'trov dlya protivogazov i respiratorov. soobshchenie 3* [The practice of using adsorbents to form an assortment of modern filters for gas masks and respirators. message 3]. *Fiziko-khimicheskie problemy adsorbtsii, struktury i khimii poverkhnosti nanoporistykh materialov: sb. tezisev dokladov Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoy 120-letiyu so dnya rozhdeniya M.M. Dubinina* [Physical and chemical problems of adsorption, structure and chemistry of the surface of nanoporous materials: Sat. abstracts of the All-Russian Conference with international participation, dedicated to the 120th anniversary of the birth of M.M. Dubinina], Moscow, October 18–22, 2021. Moscow: Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry named after V.I. A.N. Frumkin RAN, 2021, pp. 288–291.
- [16] Lyang A.V. *Razrabotka novykh khimicheskikh poglotiteley i fil'trov SIZOD na ikh osnove dlya ispol'zovaniya v chrezvychaynykh situatsiyakh* [Development of new chemical absorbers and RPE based on them for use in emergency situations]. *Dis. Cand. Sci. [Tech.]*. St. Petersburg, 2007, 277 p.
- [17] Romanov Yu.A., Kuz'mina N.S., Lyang A.V., Kutumina G.A. *Adsorbent dlya sredstv zashchity organov dykhaniya* [Adsorbent for means of protection of respiratory organs]. Pat. 2154525 RF, IPC B01J 20/20(2006.01), A62D 9/00(2006.01), B01J 20/02; applicant and patent holder CJSC «Sorbent-Center Implementation». No. 99118475/12; dec. 25.08.1999; publ. 20.08.2000.
- [18] Romanov Yu.A., Lyang A.V., Kuz'mina N.S., Kutumina G.A. *Adsorbent dlya sredstv zashchity* [Adsorbent for protective equipment]. Pat. 2223817 RF, IPC B01J 20/20(2006.01), A62B 23/00(2006.01), B01J 20/02; applicant and patent holder ZAO Sorbent-Center Implementation, OAO Sorbent. No. 2003106341/15; dec. 3 May 2003; publ. 20.02.2004.
- [19] Romanov Yu.A., Lyang A.V., Kuz'mina N.S., Kutumina G.A. *Protivogazovaya korobka* [Anti-gas box]. Pat. 2228211 Russian Federation, IPC A62B23/02; applicant and patent holder CJSC «Sorbent Center Implementation», No. 2003111061/12; dec. 17.04.2003; publ. 10.05.2004.
- [20] GOST 12.4.122–2020 *Sistema standartov bezopasnosti truda. Sredstva individual'noy zashchity organov dykhaniya. Fil'try protivogazovyye i kombinirovannyye bol'shogo gabarita. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [System of labor safety standards. Personal respiratory protection. Anti-gas and combined filters of large dimensions. General specifications]. Moscow: Standartinform, 2020, 10 p.
- [21] Romanov Yu.A., Lyang A.V. *Adsorbent dlya sredstv individual'noy zashchity organov* [Adsorbent for means of individual protection of organs]. Pat. 22245592 Russian Federation, IPC B01J 20/20(2006.01), B01J 20/02; applicant and patent holder CJSC «Sorbent-Center Implementation». No. 2002131029/15; dec. 18.11.2002; publ.27.02.2004.
- [22] Romanov N.Yu., Lyang A.V., Farberova E.A., Kuz'mina N.S., Kutumina G.A. *Poglotitel' dlya oblegchennykh respiratorov* [Absorber for lightweight respirators]. Pat. 2230610 Russian Federation, IPC B01J20/20, B01J20/02, A62B23/02; applicant and patent holder CJSC «Sorbent-Center Implementation». No. 2002133829/15; dec. 15.12.2002; publ. 20.06.2004.
- [23] Olontsev V.F. *Rossiyskie aktivnye ugli* [Russian active coals]. Perm': Aist, 1996, 90 p.
- [24] TU 2165-030-05795731–00 *Katalizator-poglotitel' K-PA* [Catalyst-absorber K-PA]. Perm': CJSC «Sorbent — Center Implementation», 2000, 10 p.
- [25] GOST 12.4.159–90 *Sistema standartov bezopasnosti truda. Sredstva individual'noy zashchity organov dykhaniya fil'truyushchie. Metody opredeleniya vremeni zashchitnogo deystviya fil'truyushche-pogloshchayushchikh korobok po gazoobraznym vrednym veshchestvam* [Occupational safety standards system. Means of individual protection of respiratory organs filtering. Methods for determining the time of the protective action of filter-absorbing boxes for gaseous harmful substances]. Moscow: USSR State Committee for Product Quality Management and Standards, 1990, 22 p.
- [26] GOST 29104.1–91 *Tkani tekhnicheskie. Metody opredeleniya lineynykh razmerov, lineynoy i poverkhnostnoy plotnostey* [Technical fabrics. Methods for determining linear dimensions, linear and surface densities]. Moscow: IPK Standards Publishing House, 2004, 7 p.
- [27] GOST 27015–86 *Bumaga i karton. Metody opredeleniya tolshchiny, plotnosti i udel'nogo ob'ema* [Paper and cardboard. Methods for determining thickness, density and specific volume]. Moscow: State Committee for Standards, 2002, 4 p.

- [28] GOST 12597–67 *Sorbenty. Metod opredeleniya massovoy doli vody v aktivnykh uglyakh i katalizatorakh na ikh osnove* [Sorbents. Method for determining the mass fraction of water in activated carbons and catalysts based on them]. Moscow: ИПК Standards Publishing House, 1988, 4 p.
- [28] TU BY 400031289.108–2009 *Materialy ugol'novoloknistye sorbtsionno fil'truyushchie BUSOFIT. Tekhnicheskie usloviya* [Carbon fiber sorption filtering materials BUSOFIT. Specifications]. Svetlogorsk: Republican Unitary Enterprise Svetlogorsk Production Association «Khimvolokno», 2009, 16 p.

## Authors' information

**Talipova Marina Valer'evna** <sup>✉</sup> — Process Engineer, JSC «Sorbent», talipova@sorbent.su

**Lyang Andrey Vladimirovich** — Cand. Sci. (Tech.), Head of the Scientific and Technical Service of Personal Protective Equipment (NTS PPE), JSC «Sorbent», avl@sorbent.su

**Shcherbak Natal'ya Vladimirovna** — Cand. Sci. (Tech.), Head of the Department of Pulp and Paper and Wood Chemical Industries, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, n.sisoeva@narfu.ru

Received 20.10.2022.

Approved after review 18.11.2022.

Accepted for publication 01.12.2022.

---

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

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПЕРИОДИЧНОСТИ ЗАТОЧКИ (ПЕРЕТОЧКИ) ЗУБЬЕВ ЛЕНТОЧНЫХ ПИЛ

Г.Ф. Прокофьев✉, О. Л. Коваленко

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

g.prokofjev@narfu.ru

Рассмотрены преимущества и недостатки ленточнопильных станков по сравнению с другими лесопильными станками. Подчеркнута необходимость своевременной заточки (переточки) ленточных пил при их эксплуатации. Предложена методика расчета времени между переточками ленточной пилы, при котором обеспечивается: требуемая долговечность пилы – время между переточками ленточной пилы определяется с учетом величины предела ограниченной выносливости пилы, определенной при заданном коэффициенте запаса прочности; требуемое качество получаемых пиломатериалов и снижение энергозатрат — время между переточками ленточной пилы определяется с учетом величины затупления зубьев ленточной пилы, характеризующейся радиусом закругления их главной режущей кромки. Отмечено, что из двух полученных значений времени между переточками пилы, необходимо принимать наименьшее значение. Рекомендуется использовать предложенную в статье методику при расчетах режимов пиления древесины на делительных и бревнопильных ленточнопильных станках.

**Ключевые слова:** ленточная пила, усталостные трещины, затупление зубьев, переточка

**Ссылка для цитирования:** Прокофьев Г.Ф., Коваленко О.Л. Определение времени периодичности заточки (переточки) зубьев ленточных пил // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 1. С. 134–138.  
DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-134-138

Ленточнопильные станки имеют некоторые существенные преимущества по сравнению с другими лесопильными станками [1–3]: низкий расход древесины в опилки вследствие малой толщины пил; возможность распиливать бревна большого диаметра в отличие от лесопильных станков других типов; малая шероховатость получаемых пиломатериалов в связи с большой скоростью резания и малыми подачами на зуб; индивидуальный раскрой бревен с учетом характерных участков их строения; нет необходимости в тяжелом фундаменте, так как значительные инерционные силы при работе такого станка не возникают.

Наряду с указанными преимуществами ленточнопильные станки обладают и серьезными недостатками. Прежде всего это низкая долговечность ленточных пил [1–9]. Во время работы в межзубовых впадинах ленточной пилы возникают усталостные трещины [10–16]. Если своевременно не удалять их вместе с дефектным слоем путем стачивания, то трещины могут развиться и привести к разрушению пилы. Таким образом, заточку зубьев ленточной пилы следует осуществлять не при достижении определенной степени затупления зубьев, как это часто делают на практике, а заранее. Коэффициент случайной убыли ленточных пил, как отмечается в справочной литературе [17], составляет 2,5...3,5. Это самый

высокий показатель аварийного расхода дерево-режущего инструмента.

При эксплуатации ленточные пилы периодически затачиваются, выполняя две функции: устраняя затупление зубьев путем уменьшения радиуса закругления главной режущей кромки зубьев и удаления дефектного слоя, вызванного усталостными явлениями в межзубовых впадинах. Для качественного и безаварийного пиления необходимо определить время между переточками (термин взят из работы [18]) из условия обеспечения прочности пилы и из условия устранения затупления зубьев. Из двух значений времени между переточками принимаем наименьшее. В этом случае обеспечивается требуемая долговечность пил и восстанавливается острота зубьев для достижения требуемого качества получаемых пиломатериалов и снижения энергозатрат.

Долговечность детали считается обеспеченной, если коэффициент запаса прочности не меньше требуемого. В процессе распиловки древесины в ленточных пилах возникают напряжения от инерционных сил, сил резания, поворота шкивов, от вальцевания, от натяжения и изгиба пил на пильных шкивах, а также температурные напряжения. Наиболее значимыми напряжениями, влияющими на долговечность ленточной пилы являются изгибающие и растягивающие напряжения, действующие на пилу во время ее работы [1]. Эти напряжения можно уменьшить, если распиловку древесины осуществлять

высокотехнологичными лесопильными станками нетрадиционной конструкции [19]. Пренебрежение остальными напряжениями дает погрешность в расчетах, и это учитывается путем принятия требуемого коэффициента запаса прочности ленточных пил  $[n] = 2$  [1].

Коэффициент запаса прочности ленточной пилы с учетом периодической заточки может быть определен по следующей формуле [1]

$$n = \frac{1}{\frac{k_3 \sigma_B \left( \frac{\sigma_n + \Delta \sigma_n}{2} + \left( \frac{\sigma_n + \sigma_n}{2} \right) \right)}{\beta \sigma_{-1N}}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_B$  — предел прочности материала пилы,

$\sigma_B = 1500$  МПа;

$k_3$  — эквивалентный коэффициент концентрации напряжений, определяемый

по формуле  $k_3 = \frac{k_n \sigma_n + k_n \sigma_n}{\sigma_n + \sigma_n}$ ;

$k_n, k_n$  — коэффициенты концентрации напряжений соответственно при изгибе и натяжении пилы;

$\sigma_n$  — напряжения от изгиба пилы на шкивах,

$\sigma_n = \frac{s}{D} E$ , МПа;

$s$  — толщина пилы, мм;

$D$  — диаметр пильных шкивов (удвоенный радиус криволинейных аэростатических опор [19], мм;

$E$  — модуль упругости материала пилы,

$E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа;

$\sigma_n$  — напряжения от натяжения пилы, принимается для делительных пил, выпускаемых по ГОСТ 6532–77 [20], равным 50...100 МПа [18], а для ленточных пил, выпускаемых по ГОСТ 10670–77 [21], равным 100...150 МПа [22];

$\Delta \sigma_n$  — изменение натяжения пилы, вызванное радиальным биением шкивов, определяется

по выражению  $\Delta \sigma_n = \frac{\Delta L}{L} E$ , МПа;

$L$  — расстояние между осями шкивов, мм;

$\Delta L$  — радиальное биение шкивов, мм;

$\sigma_{-1N}$  — предел ограниченной выносливости, МПа;

$\beta$  — коэффициент, учитывающий влияние качества обработки поверхности впадин между зубьями,  $\beta = 0,6 \dots 0,9$ .

Предел ограниченной выносливости может быть получен по формуле [1]

$$\sigma_{-1N} = 1665 - 204 \lg \frac{120\,000 t v}{L_n}, \quad (2)$$

где  $t$  — время работы пилы между переточками, мин;

$v$  — скорость движения пилы (скорость резания), м/с;

$L_n$  — длина пилы, мм.

Предел ограниченной выносливости можно также выразить в соответствии с формулой (1), приняв коэффициент запаса прочности  $n = 2$ , что отвечает требуемой долговечности ленточной пилы. Имеем

$$\sigma_{-1N} = \frac{k_3 \sigma_B \left( \frac{\sigma_n + \Delta \sigma_n}{2} \right)}{\beta \left( \frac{\sigma_B - \sigma_n}{2} - \sigma_n \right)}. \quad (3)$$

Приравняв значения  $\sigma_{-1N}$ , полученные по формулам (2) и (3) и выполнив соответствующие преобразования, выражаем значение времени между переточками, при котором обеспечивается требуемая долговечность ленточной пилы.

*Пример.* Ленточная пила толщиной  $s = 1,2$  мм работает на делительном ленточнопильном станке. Межосевое расстояние пильных шкивов  $L = 2000$  мм. Максимальная длина пилы  $L_n = 7925$  мм. Шкивы станка имеют диаметр  $D = 1250$  мм. Скорость резания  $v = 40$  м/с. Пила изготовлена из стали марки 9ХФ, имеющей предел прочности  $\sigma_B = 1500$  МПа. Модуль упругости при изгибе  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа. Коэффициент, учитывающий качество заточки зубьев, принимается  $\beta = 0,7$ . Напряжение изгиба  $\sigma_n = 266,4$  МПа, напряжение от натяжения пилы  $\sigma_n = 100$  МПа, напряжение, вызванное радиальным биением шкивов  $\Delta \sigma_n = 10$  МПа, эквивалентный коэффициент концентрации напряжений при  $k_n = 1,23$  [23] и  $k_n = 1,53$  [24] получается равным  $k_3 = 1,4$ . Коэффициент запаса прочности принимаем  $n = 2$ , что обеспечивает безаварийную работу пилы. Зубья пилы периодически затачиваются и удаляется дефектный слой, вызванный усталостными явлениями.

Подставив значения  $k_3, \sigma_B, \sigma_n, \sigma_n, \Delta \sigma_n, \beta$  в формулу (3), имеем предел ограниченной выносливости  $\sigma_{-1N} = 621,3$  МПа. Затем находим величину  $\frac{\sigma_{-1N} - 1665}{-204}$ , равную 5,116 и, используя таблицу антилогарифмов, получаем число, стоящее под знаком логарифма  $N = 130617$ . Находим время переточек для удаления дефектного слоя и обеспечения прочности пилы:

$$t_n = \frac{N L_n}{120\,000 v} = \frac{130\,617 \cdot 7925}{120\,000 \cdot 40} = 215,7 \text{ мин} = 3,6 \text{ ч.}$$

Заточка зубьев ленточной пилы выполняется также для повышения остроты зубьев, характеризующейся радиусом закругления их главной режущей кромки. В справочнике по лесопилению [17] отмечается, что величина затупления зубьев ленточных пил  $\rho$  находится в пределах 0,02...0,05 мм. С увеличением затупления пил ухудшается качество пиломатериалов и растут энергозатраты. Принимаем наименьшее допустимое значение  $\rho = 0,02$  мм при котором обеспе-

чивается требуемое качество пиломатериалов и пиление выполняется с минимальными энергозатратами.

Приращение затупления зубьев ленточной пилы определяется по формуле, приведенной в работе А.Л. Бершадского и Н.И. Цетковой [25]

$$\Delta\rho = \varepsilon \frac{h n T}{1 + 2 \frac{L}{\pi D}} k_{\text{ст}},$$

где  $\varepsilon$  — приращение затупления зубьев ленточных пил на пути резания 1 м, мкм;

$h$  — высота пропила, м;

$n$  — частота вращения пильных шкивов, об./мин;

$T$  — время работы станка, мин;

$L$  — расстояние между осями шкивов, мм;

$D$  — диаметр пильных шкивов, мм;

$k_{\text{ст}}$  — коэффициент использования станка.

Затупление за время работы станка между переточками  $t_3$ , мкм, составляет

$$\rho = \varepsilon \frac{h n t_3}{1 + 2 \frac{L}{\pi D}} k_{\text{ст}}. \quad (4)$$

Время (мин) между переточками, при затуплении зубьев меньше допустимой величины, определяется по выражению

$$t_3 = \frac{\rho \left( 1 + 2 \frac{L}{\pi D} \right)}{\varepsilon h n k_{\text{ст}}}. \quad (5)$$

*Пример.* На делительном ленточнопильном станке с диаметром пильных шкивов  $D = 1250$  мм при частоте их вращения  $n = 500$  об./мин распиливается древесина сосны с высотой пропила  $h = 0,4$  м. Расстояние между осями шкивов  $L = 2000$  мм. Коэффициент использования станка  $k_{\text{ст}} = 0,7$ . Коэффициент  $\varepsilon = 0,001$ . Подставив в выражение (5) принятые значения, находим

$$t_3 = \frac{20 \left( 1 + 2 \frac{2000}{3,14 \cdot 1250} \right)}{0,001 \cdot 0,4 \cdot 500 \cdot 0,7} = 288,4 \text{ мин} = 4,8 \text{ ч.}$$

Из двух значений  $t_{\text{п}}$  и  $t_3$  принимаем наименьшее  $t = 3,6$  ч.

## Выводы

Предложенная методика позволяет рассчитать время между переточками ленточной пилы, при котором обеспечивается долговечность пилы и требуемое качество получаемых пиломатериалов. Таким образом, для делительных и бревнопильных ленточнопильных станков предложенная методика может применяться при расчетах режимов распиловки древесины на этих станках.

## Список литературы

- [1] Прокофьев Г.Ф. Интенсификация пиления древесины рамными и ленточными пилами. М.: Лесная пром-сть, 1990. 240 с.
- [2] Феоктистов А.Е. Ленточнопильные станки. М.: Лесная пром-сть, 1976. 152 с.
- [3] Фергин В.П. Интенсификация процессов пиления древесины. М.: Лесная пром-сть, 1988. 114 с.
- [4] Санев В.И. К вопросу о запасе прочности полотен ленточных пил. Л.: Изд-во ЛТА, 1981. 8 с.
- [5] Феоктистов А.Е. Подготовка ленточных пил к работе. М.: Лесная пром-сть, 1971. 71 с.
- [6] Малышев Ю.В. Влияние некоторых факторов на долговечность полотен ленточных делительных пил. Л.: Изд-во ЛТА, 1974. 10 с.
- [7] Добрынин Е.Д. Исследование причин аварийного расхода ленточных пил // Механическая технология древесины: межвуз. сб. науч. тр. Л.: Изд-во ЛТА, 1976. С. 45–46.
- [8] Швамм Л.Г. Исследование и разработка методов повышения долговечности ленточных пил для распиловки древесины: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л.: Изд-во ЛТА, 1982. 20 с.
- [9] Веселкова Б.А. Исследование и разработка рекомендаций по повышению работоспособности ленточных пил для распиловки древесины: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л.: Изд-во ЛТА. 1978 - 16 с.
- [10] Трубников И.И. Напряжения в полотне ленточных пил, подвергнутых поверхностному наклепу // ИзВУЗ Лесной журнал, 1965. № 2. С. 104–108.
- [11] Добрынин Е.Д. Концентрация напряжений в полотне пил от насечки зубьев // Деревообрабатывающая промышленность, 1962. № 4. С. 10–11.
- [12] Лейхтлинг К.А., Кузнецов А.М., Сияговская М.С. Исследования характера трещин в ленточных пилах // Механическая обработка древесины: науч. техн. реф. сб. ВНИПИЭИлеспром, 1971. № 10. С. 7–8.
- [13] Малышев Ю.В. Исследование некоторых условий, обеспечивающих рациональную эксплуатацию ленточных делительных пил с твердым сплавом для распиловки древесины: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ленинград, 1974. 20 с.
- [14] Печуров Г.П. Причины образования трещин в полотне ленточных пил при их подготовке // Механическая обработка древесины: науч. техн. реф. сб. ВНИПИЭИлеспром, 1976. № 8. С. 12–13.
- [15] Трубников И.И. Усталостное разрушение полотен ленточных пил // ИзВУЗ Лесной журнал, 1965. № 6. С. 91–93.
- [16] Феоктистов А.Е. Причины появления трещин в полотне ленточных пил // Деревообрабатывающая промышленность, 1960. № 5. С. 12–14.
- [17] Варфоломеев Ю.А., Дружин И.С., Дьячков Ю.А. Справочник по лесопилению / Под ред. А.М. Копейкина. М.: Экология, 1991. 496 с.
- [18] Настенко А.А., Веселков В.И. Технологические режимы РИ 04–00. Подготовка делительных ленточных пил. Архангельск: Изд-во ЦНИИМОД, 1976. 66 с.
- [19] Прокофьев Г.Ф. Создание высокотехнологичных лесопильных станков. Архангельск: Изд-во АО «СОЛТИ», 2018. 157 с.
- [20] ГОСТ 6532–77. Пилы ленточные для распиловки древесины. Технические условия. Введ.1977-25-05. М.: Изд-во стандартов. 1977. 6 с.
- [21] ГОСТ 10670–77 Пилы ленточные для распиловки бревен и брусьев Технические условия. Введ.1978-01-07. М.: Изд-во стандартов. 1977. 6 с.

- [22] Власов В.П., Жернокуй М.А., Кузнецов А.М. Технологические режимы РИ 05-00. Подготовка ленточных пил для распиловки бревен и брусьев. Красноярск: Изд-во СибНИИЛП, 1980. 106 с.
- [23] Прокофьев Г.Ф., Коваленко О.Л., Черепанов С.А. Определение коэффициента концентрации напряжений в межзубовых впадинах ленточных пил при изгибе // ИзВУЗ Лесной журнал, 2015. № 4. С. 50–56.
- [24] Прокофьев Г.Ф., Коваленко О.Л. Определение коэффициента концентрации напряжений в межзубовых впадинах ленточной пилы при ее натяжении // ИзВУЗ Лесной журнал, 2016. № 3. С. 117–123.
- [25] Бершадский А.Л., Цветкова Н.И. Резание древесины. Минск: Вышэйш. шк., 1975. 303 с.

## Сведения об авторах

**Прокофьев Геннадий Федорович** <sup>✉</sup> — профессор, д-р техн. наук, академик РАЕН, заслуженный изобретатель РФ, почетный работник высшего профессионального образования РФ, g.prokofjev@narfu.ru

**Коваленко Олег Леонидович** — ст. преп. кафедры инжиниринга транспортно-технологических средств и оборудования ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), o.kovalenko@narfu.ru

Поступила в редакцию 17.05.2022.

Одобрено после рецензирования 30.09.2022.

Принята к публикации 16.11.2022.

## FREQUENCY DETERMINATION OF BAND SAW TEETH GRINDING (REGRINDING)

**G.F. Prokof'ev** <sup>✉</sup>, **O.L. Kovalenko**

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

g.prokofjev@narfu.ru

The advantages and disadvantages of band saws in comparison with other sawmills are considered. The necessity of timely grinding (regrinding) of band saws during their operation is emphasized. A method for calculating the time between regrindings of a band saw is proposed, which ensures the required service life of the saw - the time between regrindings of a band saw is determined taking into account the value of the limited endurance of the saw, determined for a given safety factor; the required quality of the lumber output and the reduction of energy consumption - the time between regrinding of the band saw is determined taking into account the amount of blunting of the band saw teeth, characterized by the radius of curvature of their main cutting edge. It is noted that of the two obtained values of the time between saw regrindings, it is necessary to take the smallest value. It is recommended to use the method proposed in the article when calculating the modes of sawing wood on separating and log band saw machines.

**Keywords:** band saw, fatigue cracks, tooth dulling, regrinding

**Suggested citation:** Prokof'ev G.F., Kovalenko O.L. *Opredelenie vremeni periodichnosti zatochki (peretochki) zub'ev lentochnykh pil* [Frequency determination of band saw teeth grinding (regrinding)]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 1, pp. 134–138. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-134-138

## References

- [1] Prokof'ev G.F. *Intensifikatsiya pileniya drevesiny ramnymi i lentochnymi pilami* [Intensification of sawing wood with frame and band saws]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest industry], 1990, 240 p.
- [2] Feoktistov A.E. *Lentochnopil'nye stanki* [Band saw machines]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest industry], 1976, 152 p.
- [3] Fergin V.P. *Intensifikatsiya protsessov pileniya drevesiny* [Intensification of wood sawing processes]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest industry], 1988, 114 p.
- [4] Sanev V.I. *K voprosu o zapase prochnosti poloten lentochnykh pil* [To the question of the margin of safety of band saw blades]. Leningrad: LTA, 1981, 8 p.
- [5] Feoktistov A.E. *Podgotovka lentochnykh pil k rabote* [Preparing band saws for work]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest industry], 1971, 71 p.
- [6] Malyshev Yu.V. *Vliyaniye nekotorykh faktorov na dolgovechnost' poloten lentochnykh delitel'nykh pil* [Influence of some factors on the durability of band saw blades]. Leningrad: LTA, 1974, 10 p.
- [7] Dobrynin E.D. *Issledovanie prichin avariynogo raskhoda lentochnykh pil* [Investigation of the causes of emergency consumption of band saws]. *Mekhanicheskaya tekhnologiya drevesiny: mezhvuz. sb. nauch. tr.* [Mechanical technology of wood: Interuniversity. Sat. scientific tr.]. Leningrad: LTA, 1976, pp. 45–46.

- [8] Shvamm L.G. *Issledovanie i razrabotka metodov povysheniya dolgovechnosti lentochnykh pil dlya raspilovki drevesiny* [Research and development of methods to improve the durability of band saws for sawing wood]. Dis. Cand. Sci. (Tech.). Leningrad: LTA, 1982, 20 p.
- [9] Veselkova B.A. *Issledovanie i razrabotka rekomendatsiy po povysheniyu rabotosposobnosti lentochnykh pil dlya raspilovki drevesiny* [Research and development of recommendations for improving the performance of band saws for sawing wood]. Dis. Cand. Sci. (Tech.). Leningrad: LTA, 1978, 16 p.
- [10] Trubnikov I.I. *Napryazheniya v polotne lentochnykh pil, podvergnutykh poverkhnostnomu naklepu* [Stresses in the blade of band saws subjected to surface work hardening]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 1965, no. 2, pp. 104–108.
- [11] Dobrynin E.D. *Kontsentratsiya napryazheniy v polotnakh pil ot nasechki zub'ev* [Stress concentration in saw blades from notching teeth]. *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Woodworking Industry], 1962, no. 4, pp. 10–11.
- [12] Leykhtling K.A., Kuznetsov A.M., Sinyagovskaya M.S. *Issledovaniya kharaktera treshchin v lentochnykh pilakh* [Investigation of the nature of cracks in band saws]. *Mekhanicheskaya obrabotka drevesiny: nauch. tekhn. ref. sb. VNIPIEIllesprom* [Mechanical processing of wood: scientific. tech. ref. Sat. VNIPIEIllesprom], 1971, no. 10, pp. 7–8.
- [13] Malyshev Yu.V. *Issledovanie nekotorykh usloviy, obespechivayushchikh ratsional'nyuyu ekspluatatsiyu lentochnykh delitel'nykh pil s tverdyim splavom dlya raspilovki drevesiny* [Study of some conditions that ensure the rational operation of band saw blades with hard alloy for sawing wood]. Dis. Cand. Sci. (Tech.). Leningrad, 1974, 20 p.
- [14] Pechkurov G.P. *Prichiny obrazovaniya treshchin v polotnakh lentochnykh pil pri ikh podgotovke* [The reasons for the formation of cracks in the blades of band saws during their preparation]. *Mekhanicheskaya obrabotka drevesiny: nauch. tekhn. ref. sb. VNIPIEIllesprom* [Mechanical processing of wood: scientific. tech. ref. Sat. VNIPIEIllesprom], 1976, no. 8, pp. 12–13.
- [15] Trubnikov I.I. *Ustalostnoe razrushenie poloten lentochnykh pil* [Fatigue failure of band saw blades]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 1965, no. 6, pp. 91–93.
- [16] Feoktistov A.E. *Prichiny poyavleniya treshchin v polotnakh lentochnykh pil* [Causes of Cracks in Band Saw Blades]. *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Woodworking Industry], 1960, no. 5, pp. 12–14.
- [17] Varfolomeev Yu.A., Druzhin I.S., D'yachkov Yu.A. *Spravochnik po lesopileniyu* [Handbook of sawmilling]. Ed. A.M. Kopeikin. Moscow: Ecology, 1991, 496 p.
- [18] Nastenka A.A., Veselkov V.I. *Tekhnologicheskie rezhimy RI 04–00. Podgotovka delitel'nykh lentochnykh pil* [Technological modes RI 04–00. Preparation of dividing band saws]. Arkhangelsk: TsNIIMOD, 1976, 66 p.
- [19] Prokof'ev G.F. *Sozdanie vysokotekhnologichnykh lesopil'nykh stankov* [Creation of high-tech sawmills]. Arkhangelsk: JSC «SOLTI», 2018, 157 p.
- [20] GOST 6532–77 *Pily lentochnye dlya raspilovki drevesiny. Tekhnicheskie usloviya. Vved.1977-25-05* [Band saws for cutting wood. Specifications. Introduced 1977-25-05]. Moscow: Publishing house of standards, 1977, 6 p.
- [21] GOST 10670–77 *Pily lentochnye dlya raspilovki breven i brus'ev Tekhnicheskie usloviya. Vved.1978-01-07* [Band saws for sawing logs and beams Specifications. Introduced 1978-01-07]. Moscow: Publishing house of standards, 1977, 6 p.
- [22] Vlasov V.P., Zhernokuy M.A., Kuznetsov A.M. *Tekhnologicheskie rezhimy RI 05-00. Podgotovka lentochnykh pil dlya raspilovki breven i brus'ev* [Technological modes RI 05-00. Preparation of band saws for sawing logs and beams]. Krasnoyarsk: SibNIILP, 1980, 106 p.
- [23] Prokof'ev G.F., Kovalenko O.L., Cherepanov S.A. *Opredelenie koeffitsienta kontsentratsii napryazheniy v mezhzubovykh vpadinakh lentochnykh pil pri izgibe* [Determination of the stress concentration factor in the interdental cavities of band saws during bending]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2015, no. 4, pp. 50–56.
- [24] Prokof'ev G.F., Kovalenko O.L. *Opredelenie koeffitsienta kontsentratsii napryazheniy v mezhzubovykh vpadinakh lentochnoy pily pri ee natyazhenii* [Determination of the stress concentration factor in the interdental cavities of a band saw when it is tensioned], 2016, no. 3, pp. 117–123.
- [25] Bershadskiy A.L., Tsvetkova N.I. *Rezanie drevesiny* [Cutting wood]. Minsk: Highest school, 1975, 303 p.

## Authors' information

**Prokof'ev Gennadiy Fedorovich**  — Dr. Sci. (Tech.), Professor, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Honored Inventor of the Russian Federation, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, g.prokofjev@narfu.ru

**Kovalenko Oleg Leonidovich** — Senior Lecturer of the Department of Engineering of Transport and Technological Means and Equipment of SAFU, o.kovalenko@narfu.ru

Received 17.05.2022.

Approved after review 30.09.2022.

Accepted for publication 16.11.2022.

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

## О ВЛИЯНИИ ЧАСТИЧНОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРАМИ НА ЭРГОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН

А.П. Соколов<sup>✉</sup>, А.А. Селиверстов, Ю.В. Суханов, В.А. Сенькин

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», 185910, Россия, Республика Карелия, г. Петрозаводск, пр. Ленина, д. 33

a\_sokolov@psu.karelia.ru

Приведен анализ влияния опции IBC (Intelligent Boom Control) для частичной автоматизации управления манипуляторами машин марки John Deere на рабочий цикл и тяжесть труда их операторов. Исследованы две машины, оснащенные системами IBC в полевых условиях. Выявлены различия в частоте и продолжительности использования органов управления телескопическим удлинителем стрелы. Определено, что в результате автоматизации одна из степеней свободы органов управления манипулятором форвардера практически полностью исключена из использования (уменьшение примерно в 10 раз). Установлено значительное сокращение (примерно в 2 раза) продолжительности использования этой же степени свободы органов управления манипулятором харвестера, что экономит психофизиологические ресурсы операторов для более эффективного использования оставшихся степеней свободы, а также совместно с более простой и интуитивно понятной логикой работы органов управления повышает производительность, точность и безопасность работы. Показано, что более простой алгоритм работы снижает уровень стереотипности действий оператора, степень его усталости и рассеянности, которые обычно проявляются ближе к концу смены.

**Ключевые слова:** лесные машины, автоматизация, рабочий цикл, манипулятор, сортиментная заготовка древесины, эргономика

**Ссылка для цитирования:** Соколов А.П., Селиверстов А.А., Суханов Ю.В., Сенькин В.А. О влиянии частичной автоматизации управления манипуляторами на эргономические показатели лесозаготовительных машин // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 1. С. 139–152. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-139-152

Основной технологией, применяемой в России на лесозаготовках в настоящее время, является сортиментная технология, базирующаяся на использовании системы машин — харвестер + форвардер [1]. Харвестер представляет собой многооперационную валочно-сучкорезно-раскряжевочную машину (ВСРМ), которая осуществляет валку дерева, подтаскивание его к волоку, обрезку сучьев, а также отмер длины с последующим поперечным делением ствола дерева на отдельные бревна — сортименты. Форвардер является транспортной машиной, основная задача которой заключается в сборе сортиментов заготовленных харвестером с последующей их транспортировкой к погрузочной площадке, расположенной у лесной автомобильной дороги. Кроме того, форвардер обычно производит сортировку лесоматериалов по размерам, породам и назначению, располагая их у дороги в разные штабеля для дальнейшей погрузки на автомобильный транспорт.

В составе технологического оборудования харвестера и форвардера присутствуют мощные и маневренные гидравлические манипуляторы, использование которых делает возможным управление каждой из машин только одним оператором.

Совершенство конструкций манипулятора, его приводов и системы управления оказывает очень большое влияние на производительность и общую эффективность эксплуатации машин [2–6]. Именно поэтому все производители харвестеров и форвардеров постоянно ведут работы по выявлению новых возможностей повышения эффективности и точности применяемых манипуляторов.

Можно выделить три основных направления совершенствования манипуляторов. Первое направление заключается в совершенствовании конструкции самого манипулятора в отношении его кинематики, общего числа и размеров звеньев, конструкций и расположения шарниров, повышения вылета, маневренности, прочности и надежности конструкции и т. д. [7, 8]. Второе направление связано с совершенствованием приводных механизмов и в целом гидросистемы машин в целях повышения грузоподъемности, скорости и точности выполнения технологических операций [9, 10]. Третье перспективное и активно развивающееся в последнее время направление базируется на использовании возможностей автоматизации управления манипулятором для повышения его производительности.

В настоящее время активно развиваются подходы к совершенствованию систем управления

манипуляторами лесозаготовительных машин, которые способны обеспечить высокую степень автоматизации, приближающуюся к уровню полностью автоматической работы промышленных роботов-манипуляторов. Эти подходы базируются на идентификации наиболее выгодных с точки зрения производительности траекторий движения рабочих органов и их реализации в автоматическом режиме с минимальным контролем со стороны операторов [11–14]. Однако следует отметить, что эти подходы пока существуют в виде теоретических разработок, некоторые — в виде лабораторных исследовательских установок, но реальное применение еще не достигнуто [15].

Некоторое время тому назад на серийных машинах нескольких крупных производителей появились интересные опции, базирующиеся на так называемой частичной автоматизации, позволяющей несколько облегчить работу оператора и повысить эффективность и производительность машины в целом [16–18]. Харвестеры и форвардеры, оснащенные данными опциями, в настоящее время уже активно используются лесозаготовительными компаниями, что позволяет в реальных условиях оценить их влияние на различные аспекты эксплуатации.

Одним из таких аспектов является вероятное снижение нагрузки на операторов машин за счет автоматизации выполнения отдельных функций, что представляется важным и, несомненно, должно быть проанализировано с точки зрения эргономики. До появления современных многооперационных машин условия труда рабочих, занятых на лесозаготовках, нельзя было назвать комфортными [19–21]. Работа зачастую выполнялась вне помещений или кабин машин под воздействием всего спектра погодных факторов, сильно отличающихся от сезона к сезону. Используемые технические средства характеризовались повышенным шумом и вибрационным воздействием, кабины машин не оснащались достаточно эффективными климатическими установками, во вдыхаемом воздухе могли содержаться выхлопные газы, а также испарения технических жидкостей и т. п.

Большим преимуществом современных многооперационных машин стало повышение комфортности рабочих мест операторов, которые по комфорту не уступают легковым автомобилям последних моделей. Однако значительно увеличилась алгоритмическая сложность рабочего цикла операторов, а также монотонность труда [22], что часто способствует ускоренному накоплению усталости и, как следствие, приводит к снижению работоспособности операторов и уменьшению производительности труда. Операторы часто испытывают определенное психологическое воздействие, связанное с нахождением длительное

время в одиночестве в лесу, особенно при работе в ночную смену [23, 24]. Таким образом, любые меры, направленные на снижение тяжести труда операторов лесозаготовительных машин, важны не только с точки зрения повышения производительности, но и с точки зрения безопасности и охраны здоровья работников. Кроме того, это может способствовать повышению привлекательности профессии оператора лесозаготовительной машины, что немаловажно в условиях дефицита квалифицированных кадров, с которым сталкиваются многие компании в данном сегменте рынка.

## Цель работы

Цель работы — анализ влияния опции Intelligent Boom Control (IBC) харвестеров и форвардеров компании John Deere, которая позволяет осуществлять частичную автоматизацию работы манипуляторов, на рабочий цикл и тяжесть труда операторов, управляющих этими машинами.

## Материалы и методы

Подход к частичной автоматизации, который в настоящее время реализован ведущими производителями таких лесных машин, как John Deere и Ponsse, получил название «Boom-tip control» (BTC) [25]. На русский язык это можно перевести как «Управление концом рукояти».



Рис. 1. Форвардер John Deere 1510G  
Fig. 1. Forwarder John Deere 1510G

При использовании обычной системы управления без автоматизации (Conventional Boom Control (CBC)) оператор с помощью органов управления машиной (джойстиков) управляет перемещением каждого звена манипулятора по-отдельности. Чаще всего и на харвестерах и на форвардерах используются четырехзвенные манипуляторы, состоящие из колонны, стрелы, рукояти и телескопического удлинителя рукояти (рис. 1). Колонна может поворачиваться вокруг вертикальной оси, стрела шарнирно сочленена с колонной, а рукоять со стрелой. Вращение стрелы



**Рис. 2.** Основные органы управления манипулятором  
**Fig. 2.** The main controls of the manipulator

и рукояти происходит вокруг горизонтальных осей. Телескопический удлинитель может совершать возвратно-поступательные движения, т. е. выдвигаться и вдвигаться, изменяя общую длину рукояти.

Основные органы управления манипулятором представляют собой два джойстика, на каждом из которых имеется дополнительная двухпозиционная кнопка-клавиша (рис. 2). Как правило, на всех машинах отклонение левого джойстика вправо-влево управляет поворотом колонны вокруг вертикальной оси, отклонение левого джойстика вперед-назад отвечает за поворот рукояти относительно стрелы, а кнопка-клавиша на левом джойстике выдвигает и задвигает удлинитель рукояти. Отклонение правого джойстика вправо-влево управляет поворотом рабочего органа (грейферного захвата или харвестерной головки) вокруг вертикальной оси, отклонение правого джойстика вперед-назад отвечает за подъем или опускание стрелы, а кнопка-клавиша на правом джойстике управляет рабочим органом.

Системы управления, реализующие принцип «Boom-tip control» изменяют стандартную логику управления таким образом, что отдельное и однонаправленное воздействие на определенный орган управления в некоторых случаях может приводить к одновременной работе приводов нескольких звеньев манипулятора для обеспечения перемещения рабочего органа, расположенного на конце рукояти, по какой-либо заранее заданной траектории, обычно прямолинейной.

В настоящей статье описаны результаты исследования работы ВТС на примере машин John Deere, оснащенных системой Intelligent Boom Control (IBC) [16], которая изменяет логику управления следующим образом. При ее использовании отклонение левого джойстика вперед-назад вызывает совместное действие приводов стрелы, рукояти



**Рис. 3.** Харвестер John Deere 1270G  
**Fig. 3.** Harvester John Deere 1270G

и телескопического удлинителя, приводящее к прямолинейному перемещению рабочего органа вперед-назад условно параллельно земной поверхности. Таким же образом отклонение правого джойстика вперед-назад вызывает совместное действие приводов, которое обеспечивает прямолинейные подъем или опускание рабочего органа условно перпендикулярно земле. В остальном логика работы органов управления остается неизменной. В результате управление становится более простым и интуитивно понятным. Кроме того, теоретически вообще пропадает необходимость использования левой кнопки-клавиши, управляющей телескопическим удлинителем рукояти.

Сбор данных для оценки влияния системы ИВС на рабочий цикл операторов был проведен в полевых условиях. Исследовались две машины, оснащенные системами ИВС: харвестер John Deere 1270G (эксплуатационная масса 20 650 кг; мощность двигателя 190 кВт; колесная формула 6×6; манипулятор СН 710; харвестерная головка Н480С) (рис. 3) и форвардер John Deere 1510G (эксплуатационная масса 18 230 кг; мощность двигателя 164 кВт; колесная формула 8×8; манипулятор CF 710; грейферный захват FX-26 (LogLift)) (см. рис. 1).



Рис. 4. Место проведения полевых исследований  
Fig. 4. Location of field research

Полевые исследования проводились в августе 2021 г. в Муезерском районе Республики Карелия Российской Федерации (рис. 4). При этом выполнялась сплошная рубка на лесосеке с типичным для Карелии разновозрастным смешанным древостоем состава 8С2Е+Б+Ос. В исследовании применялись относительно новые лесозаготовительные машины с наработкой около 5,4 тыс. мото-час.

В исследовании приняли участие профессиональные операторы, постоянно работающие на рассматриваемых машинах. При этом опыт работы оператора харвестера составил 10 лет, оператор форвардера отработал на подобных машинах 18 лет. Оба оператора ранее активно работали на лесосечных машинах без ИВС. Опыт работы обоих операторов на машинах с ИВС составил около одного года. Для того чтобы исключить влияние технического состояния оборудования на результаты исследования, перед их началом с участием независимого инструктора службы технической поддержки и обучения компании-дилера John Deere была выполнена проверка и настройка манипуляторов обеих машин в соответствии со спецификациями производителя.

В качестве метода сбора информации о рабочем цикле операторов при использовании основных органов управления манипуляторами (джойстиком) была применена видеосъемка в кабине машин с последующим камеральным хронометрическим анализом полученных видеозаписей. Как было отмечено выше, использование ИВС оказывает наибольшее влияние на

функцию выдвигания и втягивания телескопического удлинителя вплоть до полной автоматизации данных процессов, что предположительно должно существенно сократить частоту или полностью исключить использование соответствующего органа управления — кнопки-клавиши на левом джойстике. Остальные органы управления продолжают использоваться практически с той же интенсивностью, изменяется лишь характер отклика манипулятора на некоторые отклонения джойстиков. По этой причине данное исследование было целиком посвящено сравнению параметров использования кнопки-клавиши, отвечающей за выдвигание телескопического удлинителя при включенной и выключенной системе ИВС.

Наблюдение за работой операторов и видеосъемку осуществляли в неизменных природно-производственных условиях на одной и той же делянке. При этом сначала операторы осуществляли работу при выключенной системе ИВС. Для харвестера время видеозаписи составляло около 1 ч, а для форвардера съемка велась в течение одного цикла, включающего в себя погрузку, движение с грузом к погрузочной площадке и разгрузку. Затем система ИВС включалась, и процесс повторялся в течение того же самого времени (цикла) для каждой машины.

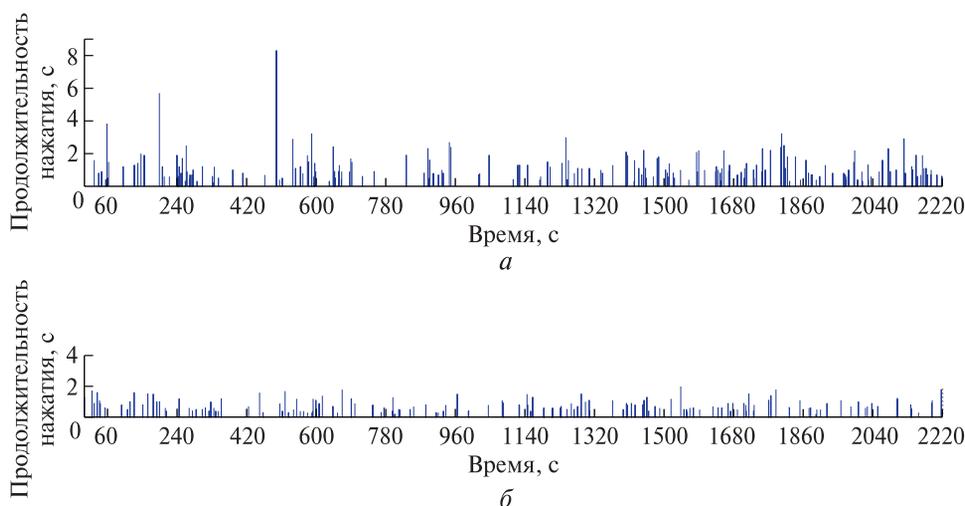
Полученные видеозаписи были проанализированы в камеральных условиях. При этом с точностью до 0,1 с фиксировались моменты нажатия оператором на кнопку-клавишу управления телескопическим удлинителем и моменты возврата ее в исходное положение, что в дальнейшем позволило определить частоту и продолжительность использования этого органа управления в случаях работы с деактивированной и активированной ИВС.

## Результаты и обсуждение

**Харвестер.** После исключения из видеозаписей времени, затраченного на подготовительные и заключительные операции, а также времени кратковременных технологических остановок машины, к анализу были приняты фрагменты продолжительностью 37 мин 36 с для харвестера с деактивированной системой ИВС и 60 мин 9 с для харвестера с активированной системой ИВС.

При этом у харвестера с деактивированной системой ИВС на протяжении всего видеофрагмента (37 мин 36 с) было зафиксировано 200 нажатий оператором на кнопку управления телескопическим удлинителем, а с активированной число нажатий составило 246 за 60 мин 9 с.

На рис. 5 приведено распределение моментов и продолжительности нажатий оператором на кнопку-клавишу управления телескопическим



**Рис. 5.** Распределение моментов и продолжительности нажатий оператором на кнопку-клавишу управления телескопическим удлинителем: *a* — харвестер без ИВС; *б* — харвестер с ИВС  
**Fig. 5.** Distribution of moments and duration of pressing by the operator on the control button of the telescopic extension: *a* — harvester without IBC; *б* — harvester with IBC

удлинителем: по оси абсцисс отложено время наблюдения, а по оси ординат — продолжительность зафиксированного однократного нажатия на кнопку. Таким образом, можно оценить моменты начала нажатий по положению штрихов, а продолжительность нажатий — по длине штрихов. Для удобства сравнения оба графика приведены для первых 37 мин наблюдений.

Общие результаты анализа показывают, что использование системы ИВС заметно сокращает частоту и продолжительность использования органа управления телескопическим удлинителем (табл. 1). Средняя частота использования кнопки на левом джойстике сократилась на 24,4 % — с 5,41 до 4,09 нажатий в минуту, средняя продолжительность однократного нажатия сократилась почти на треть (31,4 %), суммарная продолжительность всех нажатий, происходящих в течение одного часа, сократилась почти в 2 раза (на 47,8 %) с 6,38 мин до 3,33 мин. Средний период между нажатиями кнопки увеличился на 32,1 % — с 11,15 с до 14,73 с.

Графики, приведенные на рис. 6, иллюстрируют степень интенсивности роста суммарной продолжительности использования кнопки-клавиши при деактивированной и активированной ИВС, что позволяет наглядно продемонстрировать эффект от ее использования.

Проведенный статистический анализ показал, что продолжительность однократного нажатия на кнопку-клавишу управления телескопическим удлинителем имеет логнормальное распределение с достаточно высокими значениями достигнутого уровня значимости как в случае активированной, так и в случае деактивированной системы ИВС (табл. 2, рис. 7, *a*, *в*).

Т а б л и ц а 1

**Общие результаты для харвестера**  
**Overall results for the harvester**

Показатель	Харвестер без ИВС	Харвестер с ИВС	Разность
Средняя продолжительность нажатия, с	1,18	0,81	-0,37 (-31,4 %)
Среднеквадратическое отклонение продолжительности нажатия, с	0,897	0,461	-0,436 (-48,6 %)
Максимальная продолжительность нажатия, с	8,3	3	-5,3 (-63,9 %)
Минимальная продолжительность нажатия, с	0,2	0,2	0
Средняя периодичность нажатий, с	11,15	14,73	3,58 (+32,1 %)
Среднеквадратическое отклонение периодичности нажатий, с	12,42	15,69	3,27 (+26,3 %)
Максимальное время между нажатиями, с	82,9	124,1	41,2 (+49,7 %)
Минимальное время между нажатиями, с	0,5	0,6	0,1 (+20,0 %)
Средняя частота нажатий, мин <sup>-1</sup>	5,41	4,09	-1,32 (-24,4 %)
Суммарная продолжительность нажатий за 1 ч, мин	6,38	3,33	-3,05 (-47,8 %)

С еще большей уверенностью можно сказать, что в данном эксперименте периодичность нажатий имела показательное распределение (см. табл. 2, рис. 7, *б*, *г*).

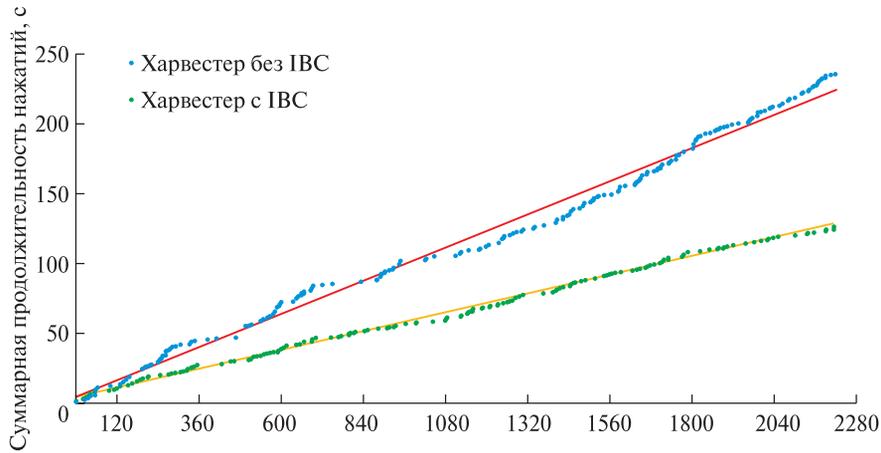


Рис. 6. Динамика суммарной продолжительности использования кнопки-клавиши управления телескопическим удлинителем харвестера

Fig. 6. Dynamics of the total duration of using the button-key to control the telescopic extension of the harvester

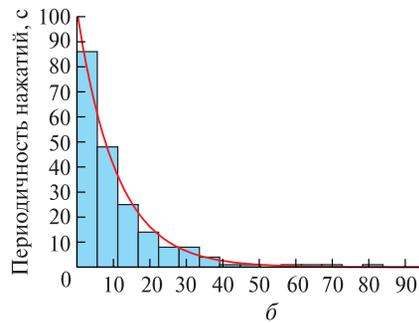
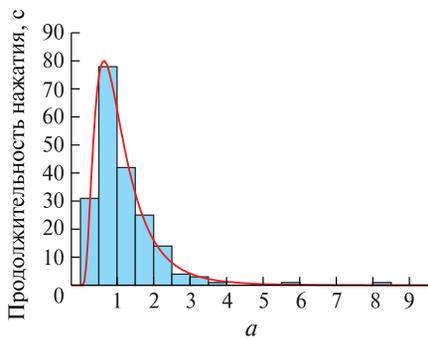
Т а б л и ц а 2

Результаты статистического анализа для харвестера

Statistical Analysis Results for the harvester

Харвестер	Переменная величина, с	Распределение	Параметры			Критерий согласия Пирсона $\chi^2$	Значимая вероятность $p$ -value
			$\bar{x}$	$\sigma$	$\lambda$		
Без ИВС	Продолжительность нажатия	Логнормальное	1,18	0,897	–	2,06	0,736
	Периодичность нажатий	Показательное	–	–	0,0897	2,61	0,760
С ИВС	Продолжительность нажатия	Логнормальное	0,81	0,461	–	5,08	0,534
	Периодичность нажатий	Показательное	–	–	0,0679	0,443	0,979

Харвестер без ИВС



Харвестер с ИВС

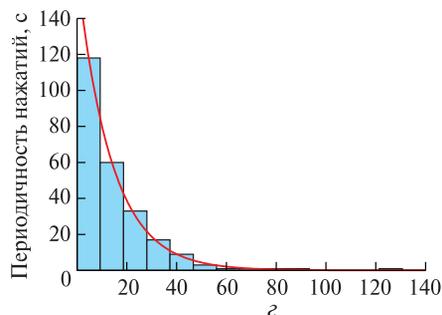
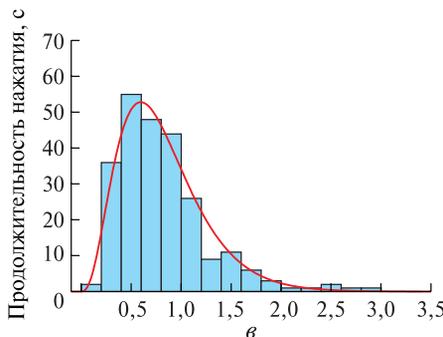
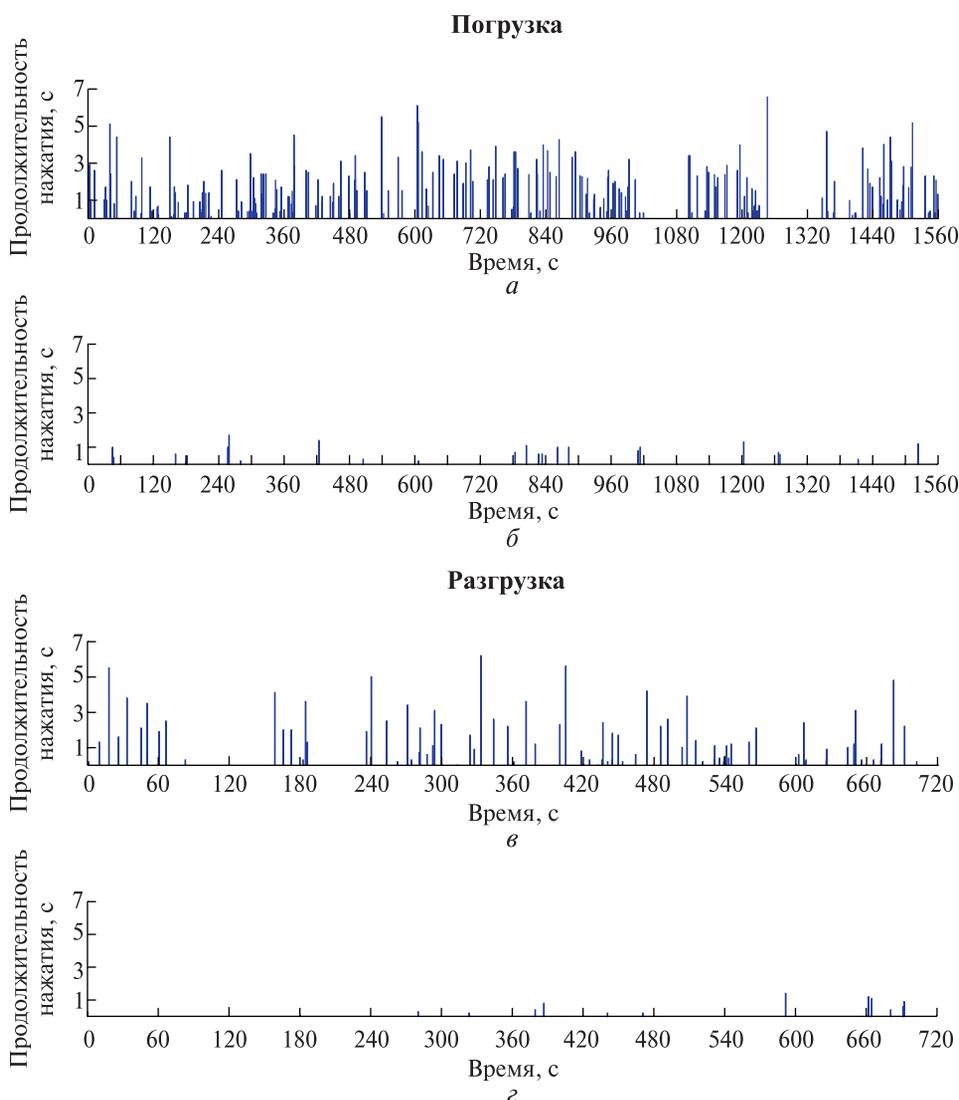


Рис. 7. Результаты статистического анализа для харвестера

Fig. 7. Results of statistical analysis for the harvester



**Рис. 8.** Распределение моментов и продолжительности нажатий оператором на кнопку-клавишу управления телескопическим удлинителем: *погрузка*: а — форвардер без ИВС; б — форвардер с ИВС; *разгрузка*: в — форвардер без ИВС; г — форвардер с ИВС

**Fig. 8.** Distribution of moments and duration of pressing by the operator on the control button of the telescopic extension: *loading*: а — forwarder without IBC; б — forwarder with IBC; *unloading*: в — forwarder without IBC; г — forwarder with IBC

**Форвардер.** Видеофиксация работы форвардера осуществлялась в течение цикла, включающего в себя три фазы: 1) сбор и погрузка сортированных на делянке; 2) грузовой ход форвардера к месту разгрузки; 3) разгрузка. В отличие от харвестера, рабочий процесс которого более или менее однороден, для форвардера характер использования манипулятора при погрузке и разгрузке несколько отличается, а в течение грузового хода манипулятор вообще не используется. В связи с этим анализ данных был проведен отдельно для фазы погрузки и фазы разгрузки. Время грузового хода было исключено из рассмотрения.

Таким образом, для форвардера с деактивированной системой ИВС к анализу были приняты фрагменты продолжительностью 26 мин 27 с на по-

грузке и 11 мин 47 с на разгрузке. Для форвардера с активированной системой ИВС продолжительность этих фрагментов составила 29 мин 12 с на погрузке и 14 мин 01 с на разгрузке. Отметим, что погрузка и разгрузка в каждом случае относилась к одному и тому же рейсу. Для форвардера с деактивированной системой ИВС на погрузке было зафиксировано 224 нажатия оператором на кнопку управления телескопическим удлинителем, на разгрузке число нажатий составило 83. Для форвардера с активированной системой ИВС число нажатий на погрузке равнялось 32, на разгрузке — только 13.

На рис. 8 показано распределение моментов и продолжительности нажатий оператором на кнопку-клавишу управления телескопическим удлинителем.

**Общие результаты для форвардера**  
**Overall results for the forwarder**

Показатель	Погрузка			Разгрузка		
	Форвардер без ИВС	Форвардер с ИВС	Разность	Форвардер без ИВС	Форвардер с ИВС	Разность
Средняя продолжительность нажатия, с	1,72	0,91	-0,81 (-47,1%)	1,69	0,62	-1,07 (-63,3%)
Среднеквадратическое отклонение продолжительности нажатия, с	1,30	0,60	-0,70 (-53,8%)	1,47	0,42	-1,05 (-71,4%)
Максимальная продолжительность нажатия, с	6,6	2,8	-3,8 (-57,6%)	6,2	1,4	-4,8 (-77,4%)
Минимальная продолжительность нажатия, с	0,1	0,2	0,1 (+100)	0,2	0,2	0
Средняя периодичность нажатий, с	6,78	53,09	46,31 (+683,0%)	8,52	60,07	51,55 (+605,0%)
Среднеквадратическое отклонение периодичности нажатий, с	9,84	57,43	47,59 (+483,6%)	10,51	72,36	61,85 (+588,5%)
Максимальное время между нажатиями, с	100,9	189,7	88,8 (+88,0%)	75,8	280,1	+204,3 (+269,5%)
Минимальное время между нажатиями, с	0,3	0,8	0,5 (+166,7%)	0,3	0,9	0,6 (+200,0%)
Средняя частота нажатий, мин <sup>-1</sup>	8,85	1,10	-7,75 (-87,6%)	7,04	0,93	-6,11 (-86,8%)
Суммарная продолжительность нажатий за 1 час, мин	15,22	0,99	-14,23 (-93,5%)	11,88	0,57	-11,31 (-95,2%)

Графики на рис. 8, а, б соответствуют фазе погрузки и приведены для первых 26 мин наблюдений, в целях сохранения равенства масштабов для сравнения, графики на рис. 8, в, г показывают ситуацию на разгрузке и приведены к 12 мин работы.

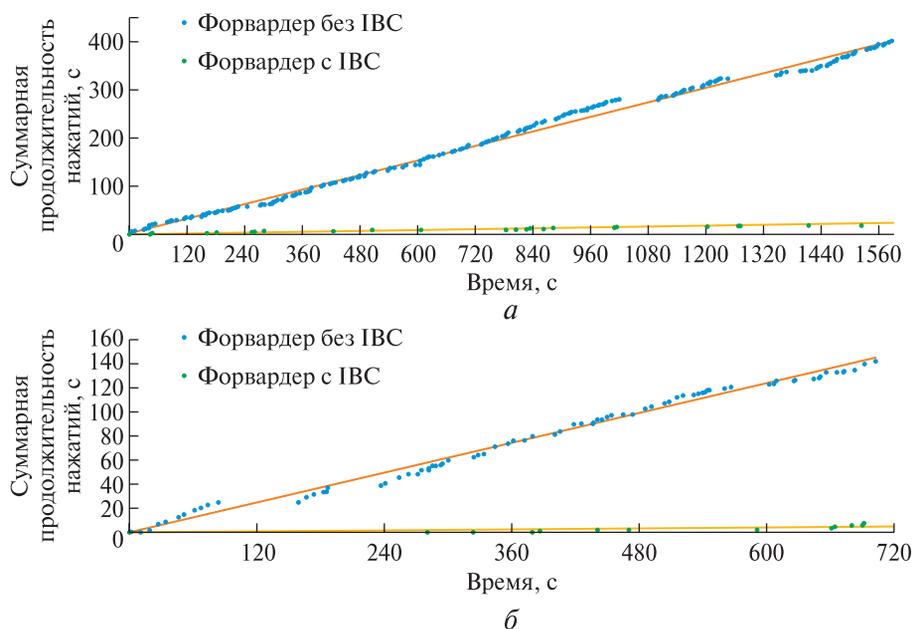
В целом общие результаты анализа показывают, что использование системы ИВС для форвардера примерно на порядок сокращает потребные частоту и продолжительность использования органа управления телескопическим удлинителем (табл. 3). Средняя частота использования кнопки на левом джойстике на погрузке сократилась на 87,6 % — с 8,85 до 1,10 нажатий в минуту, на разгрузке зафиксировано примерно такое же сокращение: на 86,8 % — с 7,04 до 0,93 нажатия в минуту. Средняя продолжительность однократного нажатия на погрузке сократилась почти в 2 раза (47,1 %), на разгрузке она сократилась более чем в 2 раза (63,3 %). Суммарная продолжительность всех нажатий, происходящих в течение одного часа, сократилась более чем в 15 раз: на 93,5 % — с 15,22 мин до 0,99 мин на погрузке и на 95,2 % — с 11,88 мин до 0,57 мин на разгрузке. Средний период между нажатиями кнопки увеличился на погрузке почти в 8 раз — с 6,78 с до 53,09 с. На разгрузке зафиксировано увеличение этого показателя примерно в 7 раз — с 8,52 с до 60,07 с.

Огромный (в 15–20 раз) эффект использования системы ИВС на форвардерах подтверждается графически (рис. 9).

Подобрать законы распределения параметров использования органа управления телескопическим удлинителем для форвардера с достаточным уровнем значимости (0,05) удалось не во всех случаях (табл. 4). Например, не удалось подобрать закон распределения продолжительности однократного нажатия на кнопку-клавишу на погрузке в случае с деактивированной системой ИВС, хотя в нашем распоряжении было достаточно большое число наблюдаемых значений — 224. Гистограмму распределения для форвардера можно увидеть на рис. 10, а.

Периодичность использования органа управления телескопическим удлинителем на погрузке без ИВС с достаточно высоким значением достигнутого уровня значимости имеет показательное распределение (табл. 4, рис. 10, б). Для форвардера с активированной ИВС этот параметр так же, как и продолжительность однократного использования кнопки, имеет логнормальное распределение с достигнутыми уровнями значимости 0,252 и 0,495 соответственно (см. табл. 4, рис. 10, в, г).

На разгрузке при использовании форвардера с деактивированной системой ИВС продолжительность однократного воздействия на орган управления имеет показательное распределение, а для периодичности нажатий более всего подходит гамма-распределение, но на пределе заданного уровня значимости ( $p$ -value = 0,074).



**Рис. 9.** Динамика суммарной продолжительности использования кнопки-клавиши управления телескопическим удлинителем форвардера: *a* — погрузка; *б* — разгрузка  
**Fig. 9.** Dynamics of the total duration of use of the forwarader telescopic extension control button: *a* — loading; *б* — unloading

Т а б л и ц а 4

**Результаты статистического анализа для форвардера**

**Statistical Analysis Results for the forwarader**

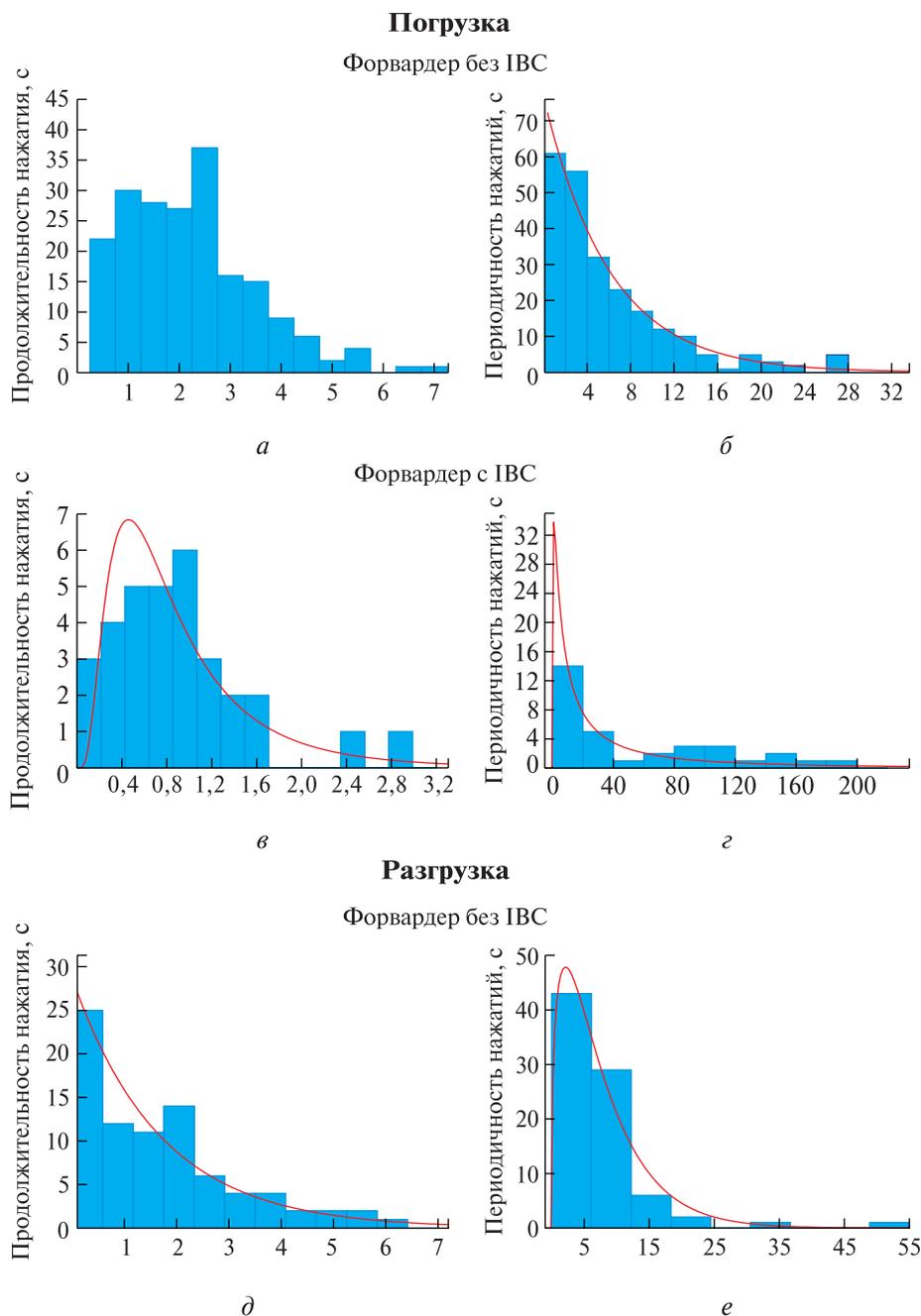
Форвардер	Переменная	Распределение	Параметры			Критерий согласия Пирсона $\chi^2$	Значимая вероятность <i>p</i> -value
			$\bar{x}$	$\sigma$	$\lambda$		
Погрузка							
Без IBC	Продолжительность нажатия, с	—	1,72	1,30	—	—	—
	Периодичность нажатий, с	Показательное	—	—	0,147	3,41	0,906
С IBC	Продолжительность нажатия, с	Логнормальное	0,91	0,60	—	1,41	0,495
	Периодичность нажатий, с	«—»	53,09	57,43	—	1,31	0,252
Разгрузка							
Без IBC	Продолжительность нажатия, с	Показательное	—	—	0,593	5,16	0,397
	Периодичность нажатий, с	Гамма	$\alpha = 0,657; \beta = 12,96$			3,19	0,074
С IBC	Продолжительность нажатия, с	—	0,62	0,42	—	—	—
	Периодичность нажатий, с	—	8,52	10,51	—	—	—

Для случая форвардера с активированной системой IBC на разгрузке проверку гипотез о распределении параметров провести не удалось в силу ограниченного числа наблюдений (всего 13).

**Выводы**

Полученные результаты позволяют однозначно утверждать, что использование системы Intelligent Boom Control (IBC) оказывает существенное влияние на параметры рабочего цикла операторов харвестеров и форвардеров John Deere. Причем эффект при использовании системы IBC на харвестере достаточно сильно отлича-

ется от такового на форвардере. Частичная автоматизация управления манипулятором хотя и не позволяет полностью исключить необходимость задействования оператором органа управления телескопическим удлинителем рукоятки, но сводит время его использования к незначительному по продолжительности у форвардера и сокращает примерно в 2 раза у харвестера (рис. 11, *a*). Действительно, средняя частота использования кнопки-клавиши, управляющей выдвиганием телескопического удлинителя рукоятки, сокращается у форвардера примерно в 8 раз (рис. 11, *б*), а общая продолжительность задействования этого органа управления — в 15–20 раз (см. рис. 11, *б*).



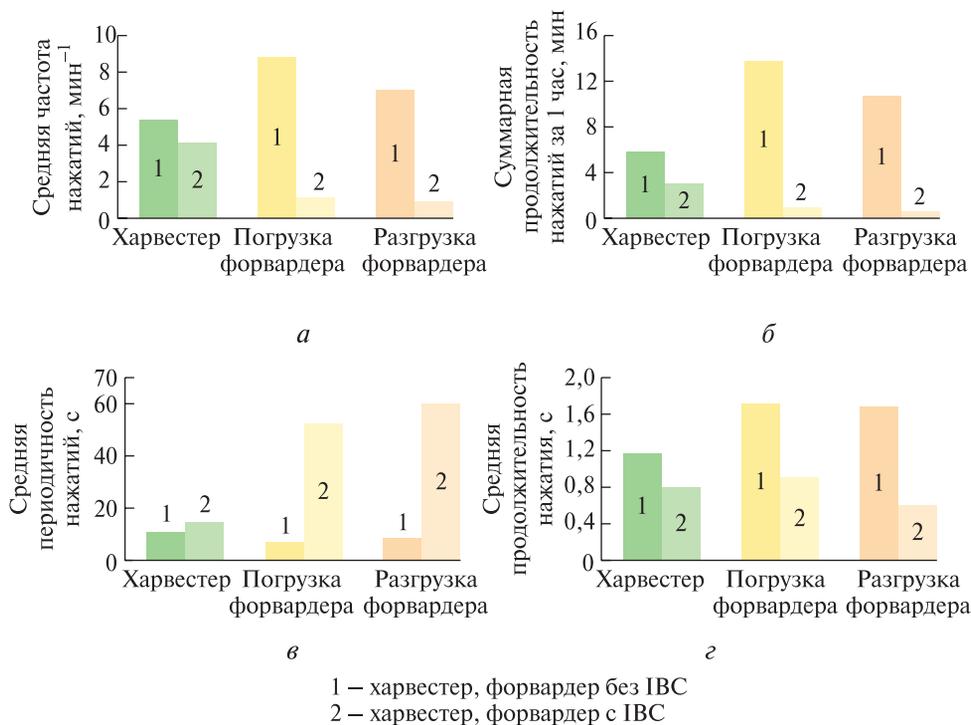
**Рис. 10.** Результаты статистического анализа для форвардера: *погрузка*: а — продолжительность нажатия без ИВС; б — периодичность нажатий без ИВС; в — продолжительность нажатия с ИВС; г — периодичность нажатий с ИВС; *разгрузка*: д — продолжительность нажатия без ИВС; е — периодичность нажатий без ИВС

**Fig. 10.** Results of statistical analysis for the forwarder: *loading*: а — duration of pressing without IBC; б — frequency of pressing without IBC; в — duration of depression with IBC; г — frequency of pressing with IBC; *unloading*: д — duration of depression without IBC; е — frequency of pressing without IBC

У харвестера результаты скромнее. Суммарное время использования этой кнопки уменьшается примерно в 2 раза (см. рис. 11, а), а средняя частота использования органа управления удлинителем сокращается примерно на четверть (см. рис. 11, б). Средняя продолжительность однократного нажатия кнопки-клавиши сокращается примерно на

треть для харвестера, наполовину для форвардера на погрузке и на две трети для форвардера на разгрузке (см. рис. 11, г).

Здесь следует отметить, что при отсутствии системы ИВС интенсивность использования удлинителя рукоятки харвестера в целом ниже, чем у форвардера. Частота использования левой



**Рис. 11.** Общие результаты исследования: *а* — средняя частота нажатий, мин<sup>-1</sup>; *б* — суммарная продолжительность нажатий за 1 час, мин; *в* — средняя периодичность нажатий, с; *г* — средняя продолжительность нажатия, с

**Fig. 11.** General results of the study: *a* — average frequency of pressing, min<sup>-1</sup>; *б* — total duration of pressing for 1 hour, min; *в* — average frequency of pressing, s; *г* — average duration of pressing, s

кнопки-клавиши на харвестере без ИВС в среднем в 1,5 раза меньше, чем на форвардере без ИВС (см. рис. 11, *б*). При этом суммарная продолжительность нажатий изначально меньше более чем в 2 раза (см. рис. 11, *а*). Низкие начальные значения в случае харвестера отчасти объясняют скромное улучшение оцениваемых параметров при внедрении ИВС.

Таким образом, практически полное исключение из использования для форвардера и существенное сокращение продолжительности использования для харвестера одной из степеней свободы органов управления манипулятором высвобождает психофизиологические ресурсы оператора для более эффективного использования оставшегося числа степеней свободы, что совместно с более простой и интуитивной логикой работы органов управления при использовании ИВС способствует повышению производительности, точности и безопасности выполнения технологических процессов сортиментной заготовки древесины. Кроме того, более простой алгоритм работы ослабляет влияние стереотипности выполняемых действий, сокращает утомляемость и снижение внимания, что обычно проявляется к концу смены.

Изложенное выше подтверждает важность применения автоматизации производственных

процессов и правильность принятого ведущими производителями лесозаготовительной техники решения о выборе принципа «Boom-tip control» (BTC) в качестве основного при разработке систем автоматизации управления манипуляторами лесозаготовительных машин на текущем этапе развития технологий.

Выявленные в процессе исследования законы распределения периодичности и времени использования органов управления телескопическим удлинителем рукояти манипуляторов лесозаготовительных машин можно использовать для построения различных моделей при проектировании манипуляторов и анализе перспективных конструкторских решений. Для харвестера законы распределения определены с высоким достигнутым уровнем значимости.

Для форвардера желательно проведение дополнительных наблюдений и измерений в целях уточнения полученных результатов и пополнения недостающих данных. В рамках данного исследования не удалось подобрать закон распределения продолжительности однократного нажатия на кнопку-клавишу управления удлинителем рукояти на погрузке форвардера при деактивированной системе ИВС, несмотря на достаточно большое число наблюдений (см. рис. 10, *а*). Предположительно в данном случае большое влияние

оказывает пространственное распределение сортиментов разного назначения по отношению к оси волока, которое создается при работе харвестера, что приводит к доминированию определенных значений потребной продолжительности работы телескопического удлинителя при сборе каждого из видов продукции (в одном рейсе форвардера обычно происходит сбор одного-двух видов сортиментов для упрощения сортировки при разгрузке) (Manner et al. 2013) [3]. Иными словами, при сборе пиловочника, будут чаще встречаться одни величины, а при сборе, например балансов, — другие.

Не слишком высокие уровни значимости достигнуты при проверке гипотез о законах распределения периодичности нажатий на погрузку с активированной ИВС (логнормальное распределение,  $p$ -value = 0,252), а также продолжительности и периодичности нажатий на разгрузку с деактивированной ИВС (показательное распределение и гамма-распределение с  $p$ -value 0,0397 и 0,074 соответственно). На цикл разгрузки также оказывают существенное влияние такие факторы, как взаимное расположение штабелей с разными видами продукции, их текущие размеры (высота) и т. д. Влияние этих факторов можно ослабить, собрав данные не по одному, а по нескольким циклам разгрузки.

Дополнительные наблюдения позволят получить результаты с более высокими уровнями значимости. Анализируя гистограммы, уже сейчас можно предположить, что при увеличении объема выборок так же, как и у харвестера, будут получены логнормальный закон распределения для продолжительности однократного нажатия на орган управления удлинителем и показательный закон для периодичности его использования. Для подтверждения этого требуются дополнительные полевые исследования.

## Список литературы

[1] Пискунов М.А. Особенности российского рынка лесозаготовительной техники // ИзВУЗ Лесной журнал, 2020. № 6. С. 132–147.  
DOI: 10.37482/0536-1036-2020-6-132-147

[2] Kellogg L.D., Bettinger P. Thinning productivity and cost for mechanized cut-to-length system in the Northwest Pacific coast region of the USA // J. of Forest Engineering, 1994, v. 5(2), pp. 43–52.  
<https://doi.org/10.1080/08435243.1994.10702659>

[3] Manner J., Palmroth L., Nordfjell T., Lindroos O. Load level forwarding work element analysis based on automatic follow-up data. // Silva Fennica, 2016, v. 50(3), article 1546. <https://doi.org/10.14214/sf.1546>

[4] Nurminen T., Korpunen H., Uusitalo J. Time consumption analysis of the mechanized cut-to-length harvesting system // Silva Fennica, 2006, v. 40(2), pp. 335–363.  
<https://doi.org/10.14214/sf.346>

[5] Piskunov M. Investigation of Structure of Technology Cycle Time of Hydraulic Manipulators in the Process of

Loading Forwarders with Logs // Croatian J. of Forest Engineering, 2021, v. 42, pp. 391–403.  
<https://doi.org/10.5552/crojfe.2021.863>

[6] Strandgard M., Mitchell R., Acuna M. Time consumption and productivity of a forwarder operating on a slope in a cut-to-length harvest system in a *Pinus radiata* D. Don pine plantation // J. of Forest Science, 2017, v. 63(7), pp. 324–330. <https://doi.org/10.17221/10/2017-JFS>

[7] Gerasimov Y.Y., Siounev V.S. Forest machinery crane compound scheme synthesis: «skeleton» part // J. of Forest Engineering, 1998, v. 9(1), pp. 25–30.

[8] Gerasimov Y.Y., Siounev V.S. Forest machinery crane compound scheme synthesis: optimization of hydraulic cylinder operating mechanisms // J. of Forest Engineering, 2000, v. 11(1), pp. 73–79.

[9] Fassbender D., Zakharov V., Minav T. Utilization of electric prime movers in hydraulic heavy-duty-mobile-machine implement systems // Automation in Construction, 2021, v. 132, article 103964.  
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103964>

[10] Heikkilä M., Linjama M. Displacement control of a mobile crane using a digital hydraulic power management system // Mechatronics, 2013, v. 23, pp. 452–461.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.mechatronics.2013.03.009>

[11] Kalmari J., Backman J., Visala A. Coordinated motion of a hydraulic forestry crane and a vehicle using nonlinear model predictive control // Computers and Electronics in Agriculture, 2017, v. 133, pp. 119–127.  
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.12.013>

[12] La Hera P., Ortiz Morales D. Model-based development of control systems for forestry cranes // J. of Control Science and Engineering, 2015, article id 256951.  
<https://doi.org/10.1155/2015/256951>

[13] Ortiz Morales D., Westerberg S., La Hera P.X., Mettin U., Freidovich L., Shiriaev A.S. Increasing the level of automation in the forestry logging process with crane trajectory planning and control // J. of Field Robotics, 2014, v. 31(3), pp. 343–363.  
<https://doi.org/10.1002/rob.21496>

[14] Westerberg S. Semi-automating forestry machines: motion planning, system integration, and human-machine interaction // Doctoral thesis. Robotics and control lab, 2014, Umeå University. Umeå: Umeå Universitet, 2014, p. 56.  
<http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:umu:diva-89067>

[15] Hansson A., Servin M. Semi-autonomous shared control of large-scale manipulator arms // Control Engineering Practice, 2010, v. 18(9), pp. 1069–1076.  
<https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2010.05.015>

[16] John Deere News and Announcements. URL: <https://www.deere.com/en/technology-products/forestry-and-logging-technology/operator-assistance-technology/> (дата обращения 14.02.2022).

[17] Manner J., Gelin O., Mörk A., Englund M. Forwarder crane's boom tip control system and beginner-level operators // Silva Fennica, 2017, v. 51(2), article 1717.  
<https://doi.org/10.14214/sf.1717>

[18] Manner J., Mörk A., Englund M. Comparing forwarder boom-control systems based on an automatically recorded follow-up dataset // Silva Fennica, 2019, v. 53(2), article id 10161. <https://doi.org/10.14214/sf.10161>

[19] Attebrant M., Winkel J., Mathiassen S.E., Kjellberg A. Shoulder-arm muscle load and performance during control operation in forestry machines: Effects of changing to a new arm rest, lever and boom control system // Applied Ergonomics, 1997, v. 28(2), pp. 85–97.

[20] Gerasimov Y., Sokolov A. Ergonomic evaluation and comparison of wood harvesting systems in Northwest Russia // Applied Ergonomics, 2014, v. 45, pp. 318–338.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.apergo.2013.04.018>

- [21] Østensvik T., Nilsen P., Veiersted K. B. Muscle Activity Patterns in the Neck and Upper Extremities Among Machine Operators in Different Forest Vehicles // *International J. of Forest Engineering*, 2008, v. 19(2), pp. 11–20. DOI: 10.1080/14942119.2008.10702563
- [22] Gellerstedt S. Operation of the Single-Grip Harvester: Motor-Sensory and Cognitive Work // *International J. of Forest Engineering*, 2002, v. 13(2), pp. 35–47. DOI:10.1080/14942119.2002.10702461
- [23] Gellerstedt S., Synwoldt U. Ergonomic initiatives for machine operators by the Swedish logging industry // *Applied Ergonomics*, 2003, v. 34, pp. 149–156.
- [24] Häggström C., Lindroos O. Human, technology, organization and environment — a human factors perspective on performance in forest harvesting // *International J. of Forest Engineering*, 2016, v. 27(2), pp. 67–78. DOI: 10.1080/14942119.2016.1170495
- [25] Löfgren B., Wikander J. Kinematic control of redundant knuckle booms // *International J. of Forest Engineering*, 2009, v. 20(1), pp. 22–30. <https://doi.org/10.1080/14942119.2009.10702572>

## Сведения об авторах

**Соколов Антон Павлович**  — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой транспортных и технологических машин и оборудования ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», [a\\_sokolov@psu.karelia.ru](mailto:a_sokolov@psu.karelia.ru)

**Селиверстов Александр Анатольевич** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры транспортных и технологических машин и оборудования ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», [alexander@psu.karelia.ru](mailto:alexander@psu.karelia.ru)

**Суханов Юрий Владимирович** — канд. техн. наук, доцент кафедры технологии и организации лесного комплекса ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», [yurii\\_ptz@bk.ru](mailto:yurii_ptz@bk.ru)

**Сенькин Виктор Александрович** — канд. техн. наук, специалист кафедры транспортных и технологических машин и оборудования ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», [SenkinVictorA@gmail.com](mailto:SenkinVictorA@gmail.com)

Поступила в редакцию 06.07.2022.

Одобрено после рецензирования 17.08.2022.

Принята к публикации 21.11.2022.

## ERGONOMIC EVALUATION OF FORESTRY CRANE PARTIAL AUTOMATION SYSTEM

**A.P. Sokolov** , **A.A. Seliverstov**, **Yu.V. Sukhanov**, **V.A. Senkin**

Petrozavodsk State University, 33, Lenin av., 185910, Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia

[a\\_sokolov@psu.karelia.ru](mailto:a_sokolov@psu.karelia.ru)

Harvesters and forwarders are the main part of cut-to-length logging system equipment. Perfection of the hydraulic cranes have a very large impact on the overall operating efficiency of these forest machines. An analysis of impact of the John Deere crane partial automation option «Intelligent Boom Control» (IBC) on the work cycle and workload of forest machines operators is described in this article. Two machines equipped with IBC systems were studied in field conditions. Differences in frequency and duration of telescopic extension boom control activations were identified. It was determined that as a result of automation, one of the degrees of freedom of the crane controls is practically completely excluded from use in the case of forwarder (decrease by about 10 times). A significant reduction in the duration of its use is observed in the case of harvester (decrease by about 2 times). As a result, this saves the psycho-physiological resources of the operator for more efficient use of remaining degrees of freedom, which, coupled with a simpler and more intuitive logic of the controls operation, improves the productivity, accuracy and safety of cut-to-length logging. In addition, a simpler work algorithm reduces the level of stereotyping of the operator's actions, fatigue and loss of attention, which usually come out at the end of the shift.

**Keywords:** forest machine operators, automation, work cycle, forestry cranes, cut-to-length logging, boom-tip control

**Suggested citation:** Sokolov A.P., Seliverstov A.A., Sukhanov Yu.V., Sen'kin V.A. *O vliyaniy chastichnoy avtomatizatsii upravleniya manipulyatorami na ergonomicheskie pokazateli lesozagotovitel'nykh mashin* [Ergonomic evaluation of forestry crane partial automation system]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 1, pp. 139–152. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-139-152

## References

- [1] Piskunov M.A. *Osobennosti rossiyskogo rynka lesozagotovitel'noy tekhniki* [Features of the harvesting and logging equipment market in Russia]. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*, 2020, no. 6, pp. 132–147. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-6-132-147
- [2] Kellogg L.D., Bettinger P. Thinning productivity and cost for mechanized cut-to-length system in the Northwest Pacific coast region of the USA. *J. of Forest Engineering*, 1994, v. 5(2), pp. 43–52. <https://doi.org/10.1080/08435243.1994.10702659>
- [3] Manner J., Palmroth L., Nordfjell T., Lindroos O. Load level forwarding work element analysis based on automatic follow-up data. *Silva Fennica*, 2016, v. 50(3), article 1546. <https://doi.org/10.14214/sf.1546>

- [4] Nurminen T., Korpunen H., Uusitalo J. Time consumption analysis of the mechanized cut-to-length harvesting system. *Silva Fennica*, 2006, v. 40(2), pp. 335–363. <https://doi.org/10.14214/sf.346>
- [5] Piskunov M. Investigation of Structure of Technology Cycle Time of Hydraulic Manipulators in the Process of Loading Forwarders with Logs. *Croatian J. of Forest Engineering*, 2021, v. 42, pp. 391–403. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2021.863>
- [6] Strandgard M., Mitchell R., Acuna M. Time consumption and productivity of a forwarder operating on a slope in a cut-to-length harvest system in a *Pinus radiata* D. Don pine plantation. *J. of Forest Science*, 2017, v. 63(7), pp. 324–330. <https://doi.org/10.17221/10/2017-JFS>
- [7] Gerasimov Y.Y., Siounev V.S. Forest machinery crane compound scheme synthesis: «skeleton» part. *J. of Forest Engineering*, 1998, v. 9(1), pp. 25–30.
- [8] Gerasimov Y.Y., Siounev V.S. Forest machinery crane compound scheme synthesis: optimization of hydraulic cylinder operating mechanisms. *J. of Forest Engineering*, 2000, v. 11(1), pp. 73–79.
- [9] Fassbender D., Zakharov V., Minav T. Utilization of electric prime movers in hydraulic heavy-duty-mobile-machine implement systems. *Automation in Construction*, 2021, v. 132, article 103964. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103964>
- [10] Heikkilä M., Linjama M. Displacement control of a mobile crane using a digital hydraulic power management system. *Mechatronics*, 2013, v. 23, pp. 452–461. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechatronics.2013.03.009>
- [11] Kalmari J., Backman J., Visala A. Coordinated motion of a hydraulic forestry crane and a vehicle using nonlinear model predictive control. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, v. 133, pp. 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.12.013>
- [12] La Hera P., Ortiz Morales D. Model-based development of control systems for forestry cranes. *J. of Control Science and Engineering*, 2015, article id 256951. <https://doi.org/10.1155/2015/256951>
- [13] Ortiz Morales D., Westerberg S., La Hera P.X., Mettin U., Freidovich L., Shiriaev A.S. Increasing the level of automation in the forestry logging process with crane trajectory planning and control. *J. of Field Robotics*, 2014, v. 31(3), pp. 343–363. <https://doi.org/10.1002/rob.21496>
- [14] Westerberg S. Semi-automating forestry machines: motion planning, system integration, and human-machine interaction. Doctoral thesis. Robotics and control lab, 2014, Umeå University. Umeå: Umeå Universitet, 2014, p. 56. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:umu:diva-89067>
- [15] Hansson A., Servin M. Semi-autonomous shared control of large-scale manipulator arms. *Control Engineering Practice*, 2010, v. 18(9), pp. 1069–1076. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2010.05.015>
- [16] John Deere News and Announcements. Available at: <https://www.deere.com/en/technology-products/forestry-and-logging-technology/operator-assistance-technology/> (accessed 14.02.2022).
- [17] Manner J., Gelin O., Mörk A., Englund M. Forwarder crane's boom tip control system and beginner-level operators. *Silva Fennica*, 2017, v. 51(2), article 1717. <https://doi.org/10.14214/sf.1717>
- [18] Manner J., Mörk A., Englund M. Comparing forwarder boom-control systems based on an automatically recorded follow-up dataset. *Silva Fennica*, 2019, v. 53(2), article id 10161. <https://doi.org/10.14214/sf.10161>
- [19] Attebrant M., Winkel J., Mathiassen S.E., Kjellberg A. Shoulder-arm muscle load and performance during control operation in forestry machines: Effects of changing to a new arm rest, lever and boom control system. *Applied Ergonomics*, 1997, v. 28(2), pp. 85–97.
- [20] Gerasimov Y., Sokolov A. Ergonomic evaluation and comparison of wood harvesting systems in Northwest Russia. *Applied Ergonomics*, 2014, v. 45, pp. 318–338. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apergo.2013.04.018>
- [21] Østensvik T., Nilsen P., Veiersted K. B. Muscle Activity Patterns in the Neck and Upper Extremities Among Machine Operators in Different Forest Vehicles. *International J. of Forest Engineering*, 2008, v. 19(2), pp. 11–20. DOI: 10.1080/14942119.2008.10702563
- [22] Gellerstedt S. Operation of the Single-Grip Harvester: Motor-Sensory and Cognitive Work. *International J. of Forest Engineering*, 2002, v. 13(2), pp. 35–47. DOI:10.1080/14942119.2002.10702461
- [23] Gellerstedt S., Synwoldt U. Ergonomic initiatives for machine operators by the Swedish logging industry. *Applied Ergonomics*, 2003, v. 34, pp. 149–156.
- [24] Häggström C., Lindroos O. Human, technology, organization and environment — a human factors perspective on performance in forest harvesting. *International J. of Forest Engineering*, 2016, v. 27(2), pp. 67–78. DOI: 10.1080/14942119.2016.1170495
- [25] Löfgren B., Wikander J. Kinematic control of redundant knuckle booms. *International J. of Forest Engineering*, 2009, v. 20(1), pp. 22–30. <https://doi.org/10.1080/14942119.2009.10702572>

## Authors' information

**Sokolov Anton Pavlovich** ✉ — Dr. Sci. (Tech.), Professor, Head of Department of Transport and Technological Machinery and Equipment, Petrozavodsk State University, a\_sokolov@psu.karelia.ru

**Seliverstov Aleksandr Anatol'evich** — Cand. Sci. (Tech.), Associated Professor of Department of Transport and Technological Machinery and Equipment, Petrozavodsk State University, alexander@psu.karelia.ru

**Sukhanov Yuriy Vladimirovich** — Cand. Sci. (Tech.), Associated Professor of Department of Technology and Management of Forest Industry Complex, Petrozavodsk State University, yurii\_ptz@bk.ru

**Sen'kin Viktor Aleksandrovich** — Cand. Sci. (Tech.), Specialist of Department of Transport and Technological Machinery and Equipment, Petrozavodsk State University, sva\_555@mail.ru

Received 06.07.2022.

Approved after review 17.08.2022.

Accepted for publication 21.11.2022.

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