



2023

*Теоретическая
и прикладная*

ЭКОЛОГИЯ

ISSN 1995-4301 (PRINT)
ISSN 2618-8406 (ONLINE)

№ 3

**Theoretical and
Applied Ecology**



**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ**

**МЕТОДОЛОГИЯ
И МЕТОДЫ
ИССЛЕДОВАНИЙ.
МОДЕЛИ И ПРОГНОЗЫ**

**МОНИТОРИНГ
ПРИРОДНЫХ
И АНТРОПОГЕННО
НАРУШЕННЫХ
ТЕРРИТОРИЙ**

**ХИМИЯ ПРИРОДНЫХ
СРЕД И ОБЪЕКТОВ**

**ЭКОЛОГИЗАЦИЯ
ПРОИЗВОДСТВА**

АГРОЭКОЛОГИЯ

**РЕМЕДИАЦИЯ И
РЕКУЛЬТИВАЦИЯ**

ЭКОТОКСИКОЛОГИЯ

**ПОПУЛЯЦИОННАЯ
ЭКОЛОГИЯ**

ЭКОЛОГИЯ И КЛИМАТ

**СОЦИАЛЬНАЯ
ЭКОЛОГИЯ**

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

<http://envjournal.ru>



Тамара Яковлевна Ашихмина

Журнал «Теоретическая и прикладная экология» издаётся с 2007 г. В декабре 2022 г. коллектив редакции журнала провёл торжественную встречу, посвящённую его 15-летию в Областной научной библиотеке им. А.И. Герцена. На встречу были приглашены все, кто имеет отношение к подготовке журнала, его редактированию, макетированию, оформлению, изданию, но самое главное – на данной встрече присутствовали авторы журнала и его читатели.

Журнал включён в российские и международные базы данных: Web of Science Core Collection, Scopus (Q3), RSCI (K2) на платформе Web of Science, Российский индекс научного цитирования (входит в ядро), Ulrichs Periodicals Directory, Google Scholar.

По результатам новой аттестации журнала в ВАК, согласно рекомендациям президиума ВАК, распоряжением Минобрнауки России от 20 марта 2023 года № 121-р издание «Теоретическая и прикладная экология» к утверждённому ранее 7 научным направлениям дополнительно включено в Перечень по следующим 5-ти научным специальностям.

Научные специальности, по которым журнал включён в Перечень ВАК:
с 1 февраля 2022 г.

- 1.4.2. Аналитическая химия (хим. науки)
- 1.5.11. Микробиология (биол. науки)
- 1.5.15. Экология (биол. и хим. науки)
- 1.5.15. Экология (хим. науки)
- 1.5.19. Почвоведение (биол. науки)
- 1.6.12. Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов (географические науки)
- 1.6.19. Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия (техн. науки)
с 20 марта 2023 г.
- 2.6.7. Технология неорганических веществ (хим. науки)
- 1.6.21. Геоэкология (геогр. науки)
- 1.6.21. Геоэкология (техн. науки)
- 1.5.15. Экология (техн. науки)
- 4.1.3. Агрохимия, агропочвоведение, защита и карантин растений (биол. науки)

Таким образом, по 12 научным специальностям журнал «Теоретическая и прикладная экология» включён в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёных степеней докторов и кандидатов наук.

Безусловно, это хороший стимул для дальнейшего развития журнала в плане отражения на его страницах новой тематики исследований по новым для журнала научным направлениям, расширения географии авторского потенциала, привлечения нового научного сотрудничества экспертов.

Редакции журнала необходимо стремиться к научному сотрудничеству с НИИ, научными фондами, вузами, природоохранными органами власти. В связи с этим есть у редакции журнала задумка выйти на информационный отдел Министерства природных ресурсов РФ с предложением издания отдельной страницей «Хроника. Информация», чтобы отражать новости в области природоохранного законодательства, результаты внедрения новых экологически безопасных технологий, а также о ходе реализации национального проекта «Экология» и входящих в него 12 федеральных проектов, с целью ориентации научных исследований на участие в решении экологических проблем.

Думаю, крайне полезным было бы на страницах журнала «Теоретическая и прикладная экология» отражать новые научные разработки и достижения в проектной деятельности по экологии в рамках грантов Президента РФ, Российского научного фонда, Российского географического научного фонда и др., с целью привлечения молодых исследователей к разработке новых проектов в области «Экология» на основе фундаментальных и прикладных методов научного исследования.

Крайне важно повышать статус журнала. На сегодняшний день журнал «Теоретическая и прикладная экология» включён в перечень журналов «белого списка» (№ 29417), утверждённом Межведомственной рабочей группой Минобрнауки, в состав которой вошли представители Российской академии наук и Российского центра научной информации. Уровень журнала в «белом списке» – K2. Так как он входит в международные наукометрические базы данных: Scopus и Web of Science Core Collection, на основании рекомендации ВАК он приравнивается к изданиям категории K1. В общем рейтинге журналов по Science Index из 3949 занимает 557 позицию.

В целом, по показателям журнал занимает не плохие позиции, но необходимо добиваться более высоких показателей как в российском, так международном рейтинге журналов.

Главный редактор журнала Т.Я. Ашихмина



**Теоретическая
и прикладная
ЭКОЛОГИЯ**
№ 3, 2023
<http://envjournal.ru>

Журнал включён в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёных степеней доктора и кандидата наук (№ 2514 по состоянию на 17.07.2023).

Журнал включён в каталог периодических изданий Ульрих (Ulrich's Periodicals Directory), в библиографические базы Scopus (SourceID 21100828916), Web of Science Core Collection, RSCI на платформе WoS, Google Scholar и Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Журнал издаётся с 2007 года.

Учредители журнала: ООО ИД «Камертон», ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет».

Главный редактор Т.Я. Ашихмина, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Вятского государственного университета, зав. лабораторией ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
Зам. главного редактора С.В. Дёгтева, д.б.н., член-корр. РАН, профессор, директор ФИЦ Коми НЦ УрО РАН

Зам. главного редактора Л.И. Домрачева, д.б.н., профессор, профессор Вятского государственного агротехнологического университета

Зам. главного редактора И.Г. Широких, д.б.н., главный научный сотрудник, зав. лабораторией Федерального аграрного научного центра Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого

Зам. главного редактора Б.И. Кочуров, д.г.н., профессор, ведущий научный сотрудник Института географии РАН

Ответственный секретарь С.Г. Скугорева, к.б.н., доцент, научный сотрудник ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН

Технические секретари:

Т.И. Кутявина, к.б.н., старший научный сотрудник Вятского государственного университета,
В.В. Рутман, младший научный сотрудник Вятского государственного университета

Адрес редакции: 610000, Кировская область, г. Киров, ул. Московская, 36. Тел. (8332) 37-02-77. E-mail: envjournal@vyatsu.ru

Статьи рецензируются. Перепечатка без разрешения редакции запрещена, ссылки на журнал при цитировании обязательны. Редакция не несёт ответственности за достоверность информации, содержащейся в рекламных объявлениях.

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Регистрационный номер и дата принятия решения о регистрации: серия ПИ № ФС77-74434 от 23 ноября 2018 г. Подписной индекс ПС248 в каталоге «Подписные издания» официального каталога АО «Почта России».

Зарубежная подписка оформляется через фирмы-партнёры ЗАО «МК-ПЕРИОДИКА» по адресу: 129110, г. Москва, ул. Гиляровского, 39, тел.: (495) 281-91-37, 281-97-63. E-mail: info@periodicals.ru; <http://www.periodicals.ru>

Издательство: ООО «О-Краткое»

Адрес издательства: 610020, Кировская область, г. Киров, ул. Свободы, 67. Оригинал-макет – Татьяна Коршунова, перевод – Григорий Кантор, Мария Сазанова, фотографии на 1-й и 4-й обложке – Александр Широких, администратор сайта журнала – Вячеслав Рутман, выпускающий редактор – Мария Зелаева.

Директор издательства «О-Краткое» Евгений Дрогов © Оформление. Издательство «О-Краткое»

Дата выхода номера: 25.09.2023. Тираж 250 экз. Заказ № 1997. Цена свободная.

Отпечатано в ООО «Кировская цифровая типография» Адрес типографии: 610017, Кировская область, г. Киров, ул. Анфисы Горбуновой, 23

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

- А.М. Асхабов** д.г.-м.н., академик РАН, профессор, научный руководитель ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
- Т.К. Головкин** д.б.н., профессор, главный научный сотрудник ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
- А. Гросс** д.х.н., профессор Орхусского университета (Дания)
- Е.В. Дабах** к.б.н., доцент, старший научный сотрудник ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
- М.В. Дородников** к.с.-х.н., доцент, научный сотрудник Университета Гёттингена им. Георга Августа (Германия)
- М. Ж. Журинов** д.х.н., академик НАН Республики Казахстан, профессор, президент НАН РК, генеральный директор АО «ИТКЭ имени Д.В. Сокольского»
- Г.М. Зенова** д.б.н., профессор, профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
- Г.Я. Кантор** к.т.н., научный сотрудник ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
- Е.Ю. Колбовский** д.г.н., профессор, ведущий научный сотрудник Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
- Э.И. Коломиец** д.б.н., академик НАН Беларуси, профессор, директор Института микробиологии НАН Беларуси
- Л.В. Кондакова** д.б.н., профессор, профессор Вятского государственного университета
- В.П. Мешалкин** д.т.н., академик РАН, профессор, директор Международного института логистики ресурсосбережения и технологической инноватики (НОЦ) РХТУ им. Д.И. Менделеева
- А.В. Кучин** д.х.н., академик РАН, профессор, зав. отделом и зав. лабораторией Института химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
- В.Н. Лажнецов** д.г.н., академик РАН, профессор, советник РАН
- В.З. Латыпова** д.х.н., член-корр. Академии наук Республики Татарстан, профессор, профессор Казанского федерального университета
- Ли Юй** д.б.н., иностранный член РАН (КНР), профессор, директор Института микологии Цзилиньского аграрного университета
- С.Г. Литвинцев** к.с.-х.н., доцент, проректор по науке и инновациям Вятского государственного университета
- В.А. Малинников** д.т.н., профессор, профессор Московского государственного университета геодезии и картографии
- А.А. Москалёв** д.б.н., член-корр. РАН, профессор РАН, зав. лабораторией ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
- С.В. Пестов** к.б.н., доцент, доцент Вятского государственного университета
- В.С. Петросян** д.х.н., профессор, зав. лабораторией Московского государственного университета
- С.А. Рубцова** д.х.н., с.н.с., директор Института химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
- В.П. Савиных** д.т.н., академик РАН, профессор, президент Московского государственного университета геодезии и картографии
- Ф. Скапини** д.б.н., профессор Университета Флоренции (Италия)
- В.А. Сысуев** д.т.н., академик РАН, профессор, научный руководитель Федерального аграрного научного центра Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого
- В.А. Терехова** д.б.н., доцент, профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
- Е.И. Тихомирова** д.б.н., профессор, зав. кафедрой Саратовского государственного технического университета
- Т.А. Трифонова** д.б.н., профессор, профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
- В.И. Холстов** д.х.н., профессор, руководитель центра ФГУП «ГосНИИОХТ»
- М.Х. Хусейн** д.б.н., профессор Университета Ассиут (Египет)
- В.В. Шириев** д.б.н., с.н.с., в.н.с. ВНИИ охотничьего хозяйства и звероводства им. проф. Б.М. Житкова
- В.Т. Юнгблюд** д.и.н., профессор, президент Вятского государственного университета



Theoretical and Applied ECOLOGY

No. 3, 2023

The journal is included in the list of the leading peer-reviewed journals and issues for publishing the main results of research for PhD and doctoral dissertations.

The journal is included into Ulrich's Periodicals Directory, bibliographic databases Scopus (SourceID 21100828916), Web of Science Core Collection, RSCI on WoS, Google Scholar and Russian Science Citation Index (RSCI).

The journal is published since 2007.

The founders of the journal: Publishing house "Kamerton", Vyatka State University.

Editor-in-Chief T.Ya. Ashikhmina,

Doctor in Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of Vyatka State University, Head of Laboratory of IB FRC Komi SC UB RAS

Vice-Editor-in-Chief S.V. Degteva,

Doctor in Biology, Corresponding Member of RAS, Professor, Director of FRC Komi SC UB RAS

Vice-Editor-in-Chief L.I. Domracheva,

Doctor in Biology, Professor, Professor of Vyatka State Agrotechnological University

Vice-Editor-in-Chief I.G. Shirokikh,

Doctor in Biology, Chief Researcher, Head of Laboratory of Federal Agricultural Research Center of North-East named N.V. Rudnitsky

Vice-Editor-in-Chief B.I. Kochurov,

Doctor in Geography, Professor, Leading Researcher of the Institute of Geography RAS

Executive Secretary S.G. Skugoreva,

PhD in Biology, Associate Professor, Researcher of IB FRC Komi SC UB RAS

Technical Secretaries:

T.I. Kut'yavina, PhD in Biology,

Senior Researcher of Vyatka State University,

V.V. Rutman, Junior Researcher of Vyatka State University

The articles are reviewed. Reprint without permission of the publisher

is prohibited, links to the journal are obligatory when citing.

The editorial Board is not responsible for the accuracy of the information contained in advertisements.

Editorial Address: 36 Moskovskaya St., Kirov, Kirov region, Russia, 610000
phone/fax: (8332) 37-02-77, e-mail: envjournal@vyatsu.ru

The edition is registered by Federal service for supervision in the sphere of communication, information technology and mass communications. Registration number and date of the decision on registration: series PI No. FS77-74434 on November 23, 2018.

Subscription index PS248 in the joint catalog "Subscription Publications" of Russian Post Service.

To effect subscription it is necessary to address to one of the partners of JSC "MK-Periodica" in your country or to JSC "MK-Periodica" directly.

Address: 39 Gilyarovskiy St., Moscow, Russia, 129110.

Tel: (495) 281-91-37, 281-97-63, Fax: (495) 281-37-98

E-mail address: info@periodicals.ru. <http://www.periodicals.ru>

Publisher: the publishing house of "O-Kratkoe"

Publisher's Address: 67 Svobody St., Kirov region, Russia, Kirov, 610020. E-mail: okrat@okrat.ru.

Designer – Tatiana Korshunova. Translation – Grigoriy Kantor,

Mariya Sazanova. Photos on the 1st and 4th cover –

Alexander Shirokikh. Administrator of Web site –

Vyacheslav Rutman. Managing editor – Mariya Zelayeva.

Director of the publishing house "O-Kratkoe" Evgeniy Drogov.

© Publishing house "O-Kratkoe".

Release date: September 25, 2023.

Circulation 250 copies. Order No. 1997. Free price.

"Kirov digital printing house", LTD

Printing Address: 23, Anfisy Gorbunovoy St., Kirov, Russia, 610017

THE EDITORIAL BOARD OF THE JOURNAL "THEORETICAL AND APPLIED ECOLOGY"

- A.M. Askhabov** Doctor in Geology and Mineralogy, Academician of RAS, Professor, Scientific Director of FRC Komi SC UB RAS
- T.K. Golovko** Doctor in Biology, Professor, Chief Researcher of IB FRC Komi SC UB RAS
- A. Gross** Doctor in Chemistry, Professor of Aarhus University (Denmark)
- E.V. Dabakh** PhD in Biology, Associate Professor, Senior Researcher of IB FRC Komi SC UB RAS
- M.V. Dorodnikov** PhD in Agricultural Sciences, Associate Professor, Professor of Georg August University of Göttingen (Germany)
- M.Zh. Zhurinov** Doctor in Chemistry, Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Professor, President of NAS RK, General Director of "D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry"
- G.M. Zenova** Doctor in Biology, Professor, Professor of Lomonosov Moscow State University
- G.Ya. Kantor** PhD in Technical Sciences, Researcher of IB FRC Komi SC UB RAS
- E.Yu. Kolbovsky** Doctor in Geography, Leading Researcher, Professor, Professor of Lomonosov Moscow State University
- E.I. Kolomiyets** Doctor in Biology, Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Director of Institute of Microbiology, National Academy of Sciences of Belarus
- L.V. Kondakova** Doctor in Biology, Professor, Professor of Vyatka State University
- V.P. Meshalkin** Doctor in Technical Sciences, Academician of RAS, Professor, Director of International Institute of Logistics Resource saving and technological Innovations of Mendeleev University of Chemical Technology
- A.V. Kuchin** Doctor in Chemistry, Academician of RAS, Professor, Head of Department and Head of Laboratory of Institute of Chemistry FRC Komi SC UB RAS
- V.N. Lazhentsev** Doctor in Geography, Professor, RAS Advisor
- V.Z. Latypova** Doctor in Agriculture, Corresponding Member of Tatarstan Academy of Sciences, Professor, Professor of Kazan Federal University
- Li Yu** Doctor in Biology, Foreign Associate of RAS (China), Professor, Director of Mycology Institute of Jilin Agricultural University
- S.G. Litvinets** PhD in Agricultural Sciences, Associate Professor, Vice-Rector for Science and Innovation of Vyatka State University
- V.A. Malinnikov** Doctor in Technical Sciences, Professor, Professor of Moscow State University of Geodesy and Cartography
- A.A. Moskalev** Doctor in Biology, Corresponding Member of RAS, Chief of the Laboratory of IB FRC Komi SC UB RAS
- S.V. Pestov** PhD in Biology, Associate Professor, Associate Professor of Vyatka State University
- V.S. Petrosyan** Doctor in Chemistry, Professor, Head of Laboratory of Moscow State University
- S.A. Rubtsova** Doctor in Chemistry, Senior Researcher, Director of the Institute of Chemistry FRC Komi SC UB RAS
- V.P. Savinykh** Doctor in Technical Sciences, Academician of RAS, Professor, President of Moscow State University of Geodesy and Cartography, Pilot-Cosmonaut, twice Hero of the Soviet Union
- F. Scapini** Doctor in Biology, Professor of Florence University (Italy)
- V.A. Sysuev** Doctor in Technical Sciences, Academician of RAS, Professor, Scientific Director Federal Agricultural Research Center of North-East named N.V. Rudnitsky
- V.A. Terekhova** Doctor in Biology, Assistant Professor, Professor of Lomonosov Moscow State University
- E.I. Tikhomirova** Doctor in Biology, Professor, Head of Department of Saratov State Technical University
- T.A. Trifonova** Doctor in Biology, Professor, Professor of Lomonosov Moscow State University
- V.I. Kholstov** Doctor in Chemistry, Professor, Head of the Center of the Federal State Unitary Enterprise "State Scientific Research Institute of Organic Chemistry and Technology"
- M.H. Hussein** Doctor in Biology, Professor of Assiut University (Egypt)
- V.V. Shiryayev** Doctor in Biology, Senior Researcher, Leading Researcher of All-Russian Research Institute of Hunting and Fur Breeding, prof. B.M. Zhitkov
- V.T. Yungblud** Doctor in History, Professor, President of Vyatka State University

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЗОРЫ

- Л. И. Домрачева, А. Л. Ковина, А. И. Коротких, С. Г. Скугорова, Т. Я. Ашихмина* Гербарии как хранители биоразнообразия и их использование (обзор) 6

СТАТЬИ

- И. А. Чернов, А. В. Толстиков* Численное моделирование распространения пассивных примесей в Белом море 21
- Н. В. Королева, Д. В. Еришов, Е. В. Тихонова, Т. Ю. Браславская, А. О. Харитонова, Е. А. Гаврилюк* Выявление ключевого биотопа бореальных пойменных лугов в национальном парке «Смоленское Поозерье» на основе спутниковых и топографических данных 28
- Н. С. Прияткин, М. В. Архипов, Л. П. Гусакова, В. Н. Пищик, Т. А. Кузнецова, А. В. Карамышева, Л. П. Трофимук, П. А. Щукина, М. А. Кузнецова* Применение метода газоразрядной визуализации для оценки скрытых дефектов семян 37

- А. Ю. Кудрявцев* Динамика экосистем свежего бора центра Приволжской возвышенности 49
- Л. В. Пилип, Н. В. Сырчина, Е. П. Колеватых, В. В. Рутман* Влияние различных типов поверхностно-активных веществ на эмиссию газов и микробиоту жидкой фракции навозных стоков 59
- Т. Я. Ашихмина, В. В. Рутман, Т. А. Адамович, Е. В. Товстик* Мониторинг распространения *Heracleum sosnowskyi* на урбанизированных территориях по данным дистанционного зондирования Земли 73
- S. A. Gareeva, A. F. Khusainov, L. M. Abramova* The factors of forming the floristic structure of railway stations embankment (on the example of the Republic of Bashkortostan) 81
- V. A. Zhigulsky, V. F. Shuisky, E. Yu. Chebykina, D. V. Zhigulskaya* Macrophyte thicket ecosystems in the Neva Bay: a response to hydraulic construction impact 88

- Т. А. Ефремова* Углеводы в поверхностных водах Карелии и их связь с содержанием биогенных и органических веществ 94
- Н. В. Климовский, А. П. Новоселов, Н. Ю. Матвеев* Оценка экологического состояния реки Сояна в зоне возможного воздействия алмазоносного месторождения 103
- Т. А. Кондратьева, Т. В. Никоненкова, А. Р. Гайсин, Т. Р. Латыпова, Н. Ю. Степанова* Использование основных гидрохимических и гидробиологических показателей для определения инвариантного состояния Куйбышевского водохранилища и его притоков 113
- А. Р. Сукиасян, Т. А. Джангирян, С. А. Унанян, А. А. Киракосян* Транслокация тяжёлых металлов в растения из почв вблизи Алавердского горнометаллургического комбината 120

- Е. С. Широкова, Е. В. Товстик, А. И. Фокина* Плёночные материалы на основе желатина, содержащие растительные экстракты 129
- В. С. Коваленко, В. П. Мешалкин, А. В. Колесников* Направления рационального и комплексного использования минеральных ресурсов недр при открытых горных работах 140

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
ПРОБЛЕМЫ
ЭКОЛОГИИ

МЕТОДОЛОГИЯ
И МЕТОДЫ
ИССЛЕДОВАНИЙ.
МОДЕЛИ
И ПРОГНОЗЫ

МОНИТОРИНГ
ПРИРОДНЫХ
И АНТРОПОГЕННО
НАРУШЕННЫХ
ТЕРРИТОРИЙ

ХИМИЯ ПРИРОДНЫХ
СРЕД И ОБЪЕКТОВ

ЭКОЛОГИЗАЦИЯ
ПРОИЗВОДСТВА

ПОПУЛЯЦИОННАЯ ЭКОЛОГИЯ	<i>А. А. Широких, И. Г. Широких</i> Ассоциации миксомицетов в лесных биоценозах (на примере заповедника «Нургуш»)150
	<i>А. Б. Новаковский, Ю. А. Дубровский, Е. Е. Кулюгина, С. В. Дёгтева</i> Изменения функционального статуса растительных сообществ вдоль высотного градиента на Северном и Приполярном Урале160
	<i>Э. В. Бабынин, С. А. Дубровная, А. Р. Каюмов</i> Влияние экологических факторов на генетический полиморфизм в природных популяциях <i>Fragaria vesca</i>171
	<i>В. Е. Пирагосов, Н. А. Мильчакова, Е. П. Карпова, С. А. Ковардаков, Л. В. Бондарева</i> Биологическое разнообразие бухты Круглой и перспективы создания орнитологического заказника (юго-западный Крым, Чёрное море)179
	<i>Е. Б. Григоркина, Г. В. Оленев</i> Дальние перемещения мелких млекопитающих в осенне-зимний период186
ЭКОЛОГИЯ И КЛИМАТ	<i>Г. Я. Кантор, Н. В. Сырчина</i> Альтернативная оценка вклада метана в парниковый эффект197
	<i>А. В. Ваганов, Е. А. Жолнерова, В. Ф. Зайков, А. И. Шмаков</i> Климатическое моделирование пригодности местообитаний <i>Erythronium sibiricum</i> (Fisch. et C.A. Mey.) Krylov208
СОЦИАЛЬНАЯ ЭКОЛОГИЯ	<i>Е. V. Karanina, N. N. Plysheva, E. V. Baldesku, A. F. Toporkova</i> Corporate carbon management system215
ИНФОРМАЦИЯ	Юбилей Елены Валентиновны Дабах222
	<i>В. А. Терехова, С. А. Кулачкова, Е. В. Морачевская</i> Международный форум «Агробиотехнологии: достижения и перспективы развития»223

CONTENTS

REVIEWS

THEORETICAL PROBLEMS OF ECOLOGY	<i>L. I. Domracheva, A. L. Kovina, A. I. Korotkikh, S. G. Skugoreva, T. Ya. Ashikhmina</i> Herbariums as custodians of biodiversity and their use (review)6
------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

ARTICLES

METHODOLOGY AND RESEARCH METHODS. MODELS AND FORECASTS	<i>I. A. Chernov, A. V. Tolstikov</i> Numerical simulation of the passive tracer advection in the White Sea21
	<i>N. V. Koroleva, D. V. Ershov, E. V. Tikhonova, T. Yu. Braslavskaya, A. O. Kharitonova, E. A. Gavrilyuk, D. G. Grummo, A. V. Sudnik</i> Detection of the key biotope of boreal floodplain meadows in the Smolensko Poozerye National Park based on satellite and topographic data28
	<i>N. S. Priyatkin, M. V. Arkhipov, L. P. Gusakova, V. N. Pishchik, T. A. Kuznetsova, A. V. Karamysheva, L. P. Trofimuk, P. A. Shchukina, M. A. Kuznetsova</i> Application of gas discharge visualization technique for seeds hidden defects evaluation37
MONITORING OF NATURAL AND ANTHROPO- GENICALLY DISTURBED AREAS	<i>A. Yu. Kudryavtsev</i> The dynamic of pine woods ecosystems on the poor sandy soils at the central part of Volga Upland49
	<i>L. V. Pilip, N. V. Syrchina, E. P. Kolevatykh, V. V. Rutman</i> Influence of various types of surfactants on gas emissions and microbiota of the liquid fraction of manure effluents59

**MONITORING OF
NATURAL AND
ANTHROPO-
GENICALLY
DISTURBED AREAS**

- T. Ya. Ashikhmina, V. V. Rutman, T. A. Adamovich, E. V. Tovstik* Monitoring the distribution of *Heracleum sosnowskyi* in urban areas based on Earth remote sensing data 73
- S. A. Gareeva, A. F. Khusainov, L. M. Abramova* The factors of forming the floristic structure of railway stations embankment (on the example of the Republic of Bashkortostan) 81
- V. A. Zhigul'skiy, V. F. Shuisky, E. Yu. Chebykina, D. V. Zhigul'skaya* Macrophyte thicket ecosystems in the Neva Bay: a response to hydraulic construction impact 88

**CHEMISTRY
OF NATURAL
ENVIRONMENTS
AND OBJECTS**

- T. A. Efremova* Carbohydrates in surface waters and its relation to the nutrients and organic matter content 94
- N. V. Klimovskiy, A. P. Novoselov, N. Yu. Matveev* The ecological status of the Soyana River in the zone of possible impact of a diamond deposit 103
- T. A. Kondrateva, T. V. Nikonenkova, A. R. Gaisin, T. R. Latypova, N. Yu. Stepanova* Use of basic hydrochemical and hydrobiological indicators to determine the invariant state of the Kuibyshev reservoir and its tributaries 113
- A. R. Sukiasyan, T. A. Jhangiryan, S. A. Hunanyan, A. A. Kirakosyan* Translocation of heavy metals into plants from the soil near the Alaverdi copper smelting enterprise 120

**ECOLOGIZATION
OF PRODUCTION**

- E. S. Shirokova, E. V. Tovstik, A. I. Fokina* Gelatin films containing plant extracts 129
- V. S. Kovalenko, V. P. Meshalkin, A. V. Kolesnikov* Directions of rational and integrated use of mineral resources of the subsoil in open-pit mining 140

**POPULATION
ECOLOGY**

- A. A. Shirokikh, I. G. Shirokikh* Associations of myxomycetes in forest biocenoses (on the example of the Nurgush Nature Reserve) 150
- A. B. Novakovskiy, Yu. A. Dubrovskiy, E. E. Kulygina, S. V. Degteva* Altitudinal variation in ecological strategies across plant communities of different vegetation types 160
- E. V. Babynin, S. A. Dubrov'naya, A. R. Kayumov* The effect of ecological factors on genetic polymorphism in natural populations of *Fragaria vesca* 171
- V. E. Giragosov, N. A. Milchakova, E. P. Karpova, S. A. Kovardakov, L. V. Bondareva* Features of the biological diversity of the Kruglaya Bay and the prospects for creating an ornithological reserve (southwestern Crimea, Black Sea) 179
- E. B. Grigorkina, G. V. Olenov* Long-distance movements of small mammals during the autumn-winter period 186

**ECOLOGY AND
CLIMATE CHANGE**

- G. Ya. Kantor, N. V. Syrchina* Alternative assessment of methane's contribution to the greenhouse effect 197
- A. V. Vaganov, E. A. Zholnerova, V. F. Zaikov, A. I. Shmakov* Climatic modeling of the habitat suitability of *Erythronium sibiricum* (Fisch. et C.A. Mey.) Krylov 208

SOCIAL ECOLOGY

- E. V. Karanina, N. N. Ilysheva, E. V. Baldesku, A. F. Toporkova* Corporate carbon management system 215

INFORMATION

- Anniversary of Elena Valentinovna Dabakh 222
- V. A. Terekhova, S. A. Kulachkova, E. V. Morachevskaya* International forum "Agrobiotechnologies: achievements and development prospects" 223

Гербарии как хранители биоразнообразия и их использование (обзор)

© 2023. Л. И. Домрачева^{1,2}, д. б. н., профессор, А. Л. Ковина², к. б. н., доцент, А. И. Коротких², аспирант, С. Г. Скугорева¹, к. б. н., н. с., Т. Я. Ашихмина^{1,3}, д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,
¹Институт биологии Коми научного центра
 Уральского отделения Российской академии наук,
 167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
²Вятский государственный агротехнологический университет,
 610017, Россия, г. Киров, Октябрьский проспект, д. 133,
³Вятский государственный университет,
 610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
 e-mail: dli-alga@mail.ru

В обзоре представлены данные об истории возникновения гербариев и фунгариев, их разнообразии и использовании. Показано, что помимо традиционного значения данных объектов для изучения систематики, морфологии, распространения растений и грибов, появились новые направления, обусловленные достижениями современной науки: молекулярно-генетическим подходом, генотипированием и секвенированием нового поколения. Это позволяет выявлять молекулярные основы фенотипической изменчивости, устойчивости к стрессовым воздействиям, создавать банки ДНК, интегрированные с гербарными коллекциями.

Сохранившийся микробный пул высушенных образцов даёт возможность выделения в чистую культуру представителей микробиоты, перспективных в биотехнологическом аспекте: в целях биомониторинга, в создании биопрепаратов направленного действия против возбудителей болезней растений.

Старинные гербарные образцы позволяют изучить пути миграции, расселения растений по континентам и экспансии эпифитотий. Анализ химического состава гербарных образцов показывает, что содержание веществ и их биологическая активность у многих растений практически не изменяется за длительный срок хранения в высушенном состоянии. При этом в изученных образцах сохраняются как полезные биологически активные вещества, так и токсины.

Ключевые слова: гербарий, растения, грибы, эпифитная и ризосферная микробиота.

Herbariums as custodians of biodiversity and their use (review)

© 2023. L. I. Domracheva^{1,2} ORCID: 0000-0002-7104-3337
 A. L. Kovina² ORCID: 0000-0003-0503-3402, A. I. Korotkikh² ORCID: 0000-0002-0700-371X,
 S. G. Skugoreva¹ ORCID: 0000-0002-5902-5187, T. Ya. Ashikhmina^{1,3} ORCID: 0000-0003-4919-0047
¹Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch
 of the Russian Academy of Sciences,
 28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
²Vyatka State Agrotechnological University,
 133, Oktyabrskiy Prospekt, Kirov, Russia, 610017,
³Vyatka State University,
 36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
 e-mail: dli-alga@mail.ru

The review presents data on the history of herbariums and fungariums, their diversity and use. It is shown that in addition to the traditional value of these objects for studying the systematics, morphology, distribution of plants and fungi, new scientific directions have emerged due to the achievements of modern science such as molecular genetic approach, genotyping, next generation sequencing. This allows identifying the molecular basis of phenotypic variability, resistance to stress, create DNA banks integrated with herbarium collections.

The surviving microbial pool of herbarium samples makes it possible to isolate into a pure culture representatives of the microbiota, promising in the biotechnological aspect: for biomonitoring purposes, to create biological products of directed action against plant pathogens.

Antique herbarium specimens make it possible to study the ways of migration and dispersal of plants across continents as well as expansion of epiphytotes. Analysis of the chemical composition of herbarium samples shows that the content of substances and their biological activity in many plants practically does not change over a long storage period in a dried state. At the same time, both useful biologically active substances and toxins are preserved in the studied herbarium specimens.

Keywords: herbarium, plants, fungi, epiphytic and rhizospheric microbiota.

Гербарии представляют собой естественные исторические коллекции, хранилища биоразнообразия, являясь центральным звеном ботанических знаний на протяжении уже более 500 лет [1–3]. Гербарии, первоначально создаваемые с целью изучения растений и хранения образцов для ботанических исследований, в настоящее время имеют полифункциональное значение, связанное с внедрением современных молекулярно-генетических методов исследования, которые оказались пригодными не только для живых организмов, но и для посмертной инвентаризации состава ДНК высушенных объектов [4, 5]. С этой точки зрения, гербарии, возраст которых колеблется от нескольких лет до нескольких сотен лет, – настоящий источник самых разнообразных открытий, связанных не только с морфолого-анатомическими и филогенетическими особенностями самих высушенных образцов (растений и грибов), но и с возможностью получения образцов микробиоты, сохранившейся на различных органах растений, на мицелии и плодовых телах грибов [6].

В старинных гербарных образцах сохраняется пул микробов, когда-то обитавших в относительно чистых экотопах, и поэтому представляющий определённый интерес для исследования их биотехнологических возможностей. Неоднократно доказана способность бактерий, микроскопических водорослей и грибов длительное время сохранять жизнеспособность, находясь в высушенном состоянии в гербарных экземплярах [7, 8].

Вследствие этого гербарные образцы представляют существенный интерес для изучения морфологического, экологического, генетического разнообразия и сопоставления особенностей современных растений, грибов и их отдалённых предков [9–12].

Цель работы – анализ литературных источников, посвящённых истории возникновения и роли гербариев в развитии науки, а также использованию гербарных образцов как источников выделения микроорганизмов,

обладающих биотехнологически ценными свойствами.

Объекты и методы исследования

При написании обзора использованы литературные источники с 1976 по 2023 гг. из базы данных научной электронной библиотеки. Обсуждаются и анализируются публикации ведущих отечественных и зарубежных учёных-исследователей, посвящённые истории возникновения и роли гербариев в развитии науки, использованию гербарных образцов как источников выделения микроорганизмов, обладающих биотехнологически ценными свойствами. Поиск источников проводили при помощи систем Яндекс и Google, а также на сайте eLIBRARY.RU по поисковым запросам: «гербарии», «фунгарии», «высшие растения», «водоросли», «микромитозы», «макромитозы», «геномный анализ», «секвенирование нового поколения».

Краткая история создания гербариев. Объекты гербаризации

Гербарии начали составлять более 500 лет назад. В настоящее время описано свыше 3500 научных гербариев, где собрано около 390 млн образцов, представленных высшими растениями, лишайниками, водорослями и грибами [5, 13]. Кроме того, гербарии имеются практически в каждом колледже, университете и ряде школ, где изучают ботанику.

Традиционно гербарии используются в систематике и таксономии при описании и классификации растений и для ботанической экспертизы при идентификации растительных образцов [3]. В настоящее время использование гербариев предполагает новые направления: определение геномной последовательности, фенотипирование, биогеографию, возникшие эволюционные и экологические изменения, популяционную генетику [14]. Гербарные образцы, являясь источником

биологического материала (листьев, цветков, плодов, семян, корней), позволяют определить вариативность в расселении растений спустя определённое время, а также изучить редкие виды, таксоны, которые в настоящее время невозможно обнаружить в природе [15–17]. С развитием ДНК-технологий гербарный материал успешно используется в молекулярной филогении для целей систематики, в реконструкции филогеографического мирового распространения видов [18].

Ещё одним путём использования гербариев являются археботанические и палеонтологические исследования, в ходе которых предварительно, много лет назад собранные растения, сравнивают с современными представителями флоры [19].

Не случайно в последние годы опубликована серия статей о путях использования гербарного материала, основанная на геномном секвенировании, с помощью которого выявляются механизмы изменчивости видов и их адаптации к меняющимся условиям, особенности биоразнообразия растений в пространстве и во времени [20–23].

Для того, чтобы гербарий имел научную ценность, необходимо наличие полноценных, правильно собранных, обработанных определённым образом и оформленных по соответствующей форме этикирования образцов, которые должны быть долговечным, легко читаемым информативным документом [24].

Анализ литературных источников показывает, что гербарии разных стран включают различное количество образцов и создавались в течение многих лет. Список крупнейших гербарных коллекций мира приведён в обзоре [13], в частности, он включает Королевский ботанический сад в Великобритании (8,5 млн образцов), Национальный музей естественной истории во Франции (около 8 млн образцов), Нью-Йоркский ботанический сад в США (более 7,8 млн образцов), Ботанический институт им. В.Л. Комарова в Санкт-Петербурге (Россия, 6 млн образцов), Центр биоразнообразия в Нидерландах (5 млн листов). В России официально зарегистрировано более 170 гербариев, из них старейший принадлежит МГУ и насчитывает более 1 млн образцов [25].

Существуют и другие авторитетные гербарные коллекции, например, один из старейших гербариев в Каталонии насчитывает 1618 листов высушенных растений, сбор которых начинался ещё в начале XVII века [26].

Гербарные образцы, собранные и хранящиеся в течение сотен лет, несут информацию

о глобальных изменениях в природе, особенностях распространения и обитания растений, их фенологических и функциональных особенностях [27–31]. Гербарии позволяют отслеживать нежелательные изменения во флоре, связанные с исчезновением отдельных видов в течение прошедшего столетия и начале нового, для обеспечения возможностей восстановления этого биоразнообразия, как, например, гербарии, находящиеся в Зимбабве [32].

Гербарии, собранные до начала XX века, принято считать историческими.

Использование правильно этикированных гербарных растений позволяет решать многие вопросы, связанные с археэкологией, окультуриванием растений, совместной динамикой изменения растений и окружающей среды [33]. Возрастающие объёмы гербарного материала, наряду с возрастанием их оцифровки, дают возможность секвенирования ДНК из высушенных растений, которая становится источником более глубокого понимания глобальных экологических изменений. При исследовании в хронологическом аспекте глобальных изменений с использованием гербарных образцов можно, по крайней мере, выявить их реакцию на четыре основных источника подобных изменений: поллютанты, изменение окружающей среды, климатические измерения, влияние инвазивных видов и, в принципе рассматривать коллекционные образцы как своеобразные «окна» в эволюционные процессы [34, 35].

Так, влияние поллютантов (тяжёлых металлов, технического азота, увеличение концентрации диоксида углерода) на растения по исследованию гербарных образцов проанализировано в ряде работ [36–39]. Показано, например, увеличение концентрации тяжёлых металлов в гербарных образцах по мере увеличения концентрации этих элементов в экотопках. При этом комбинированное загрязнение приводит к генетическим изменениям и в то же время, к повышению адаптационных возможностей растений. Увеличение дозы применяемых минеральных азотных удобрений с 1960 г. показало особую чувствительность бактериального населения корневой и прикорневой зоны. Увеличение концентрации CO₂, связанное со сжиганием ископаемого топлива, приводит к морфологическим изменениям, например, таким, как снижение плотности устьиц на листьях [37].

Помимо поллютантов, урбанизация и модернизированное сельское хозяйство стано-

влятся причиной потерь, фрагментации и изменения естественной среды обитания живых организмов. На уровне гербарных растений это приводит к сокращению видового разнообразия на конкретной территории [40]. Одним из таких примеров является исчезновение женьшеня американского (*Panax quinquefolius*) в результате вырубленных массивов и интенсивного сбора растений диких популяций на территории США [41]. Другим примером воздействия внешних факторов в историческом аспекте на растения является отсутствие поллинириев у свежегербаризированных растений, выявленное при сравнении гербарных образцов семейства Орхидные (*Pteryggodium catholicum*) [42]. Поллинирии, представляющие склеенные комочки пыльцы, играют особую положительную роль в размножении растений этого семейства.

Изменение климата в сторону потепления проявляется в модификации жизненных циклов растений и при этом установлено, что у растений, собранных в одинаковые сроки, происходит более раннее цветение и созревание плодов [23,43].

Ещё одной причиной изменения видового разнообразия на определённой территории, которое можно выявить по гербарным образцам, является инвазия чужеземных видов, чаще всего сознательно или бессознательно спровоцированная человеком [44].

Один из примеров реконструкции состояния болот Центральной Европы за длительный период – изучение гербаризованного мха рода *Sphagnum*, собранного за период 1918–1998 гг. [45]. Изменение химического состава воды, происходящее под влиянием различных антропогенных факторов, определяли по диатомовым водорослям, попавшим в гербарий вместе со сфагнумом. Установлено, что, начиная с 90-х годов XX века, происходит существенное изменение видового состава диатомовых водорослей и смена доминантов.

Кроме того, гербаризированные растения рассматриваются и в аспекте их взаимоотношений с микробиомом, который играет важнейшую роль в их жизни, физиологии и биохимии, в ответе растений на абиотические и биотические факторы, стрессовые ситуации, распространение в определённых ареалах. Поэтому параллельно изучению гербаризированных растений проводится и тщательное изучение их сохранившейся микробиоты [46–49].

При этом особую роль играет изучение фитопатогенов, так как наши знания

о темпах распространении болезней растений, специфике во взаимоотношениях с растением-хозяином всё ещё сильно отстают от запросов сельского хозяйства [50]. Гербарные же образцы позволяют сравнивать распространение болезней в диких популяциях и у культурных растений, что даёт возможность в определённой степени моделировать трансмиссию патогенов [51]. Поэтому неоднократно проводились исследования взаимоотношений «дикое растение – патогенная система» с привлечением гербарных коллекций [52–55].

Фунгариумы – микологические гербарии

Грибы – представители особого царства природы. Известно около 70000 видов. Однако число известных видов всё ещё существенно отстаёт от имеющихся оценок предполагаемого видового разнообразия грибов, достигающего 1–5 млн видов, т. е. более, чем в 60 раз, по сравнению с описанным [56, 57].

Полагают, что микология должна быть независимой от ботаники, микробиологии и зоологии как особое направление науки [58, 59]. В настоящее время по степени изученности грибы относятся к одному из наименее исследованных царств живой природы, что затрудняет оценку их биоразнообразия и, следовательно, мероприятий по их сохранению [60].

Коллекционные образцы высушенных грибов называются фунгариумы. Это название появилось сравнительно недавно, в 2010 г. [61]. Термин предложили для обозначения части гербарных коллекций, содержащих грибы. Некоторые фунгариумы насчитывают 50000–1250000 экземпляров [62].

Фунгариумы как часть законсервированного материала существуют в различных странах: Германии [62], России [57], США [63]. В России один из самых первых фунгариумов микро- и макромицетов был создан в 1918 г. в Воронежском университете как часть гербария им. Б.М. Козо-Полянского, который является важной базой для таких разнотипных исследований, как изучение систематики, изменчивости морфологии, ареалов макромицетов, экологии и трофической приуроченности видов [64]. При этом микологическая коллекция представлена 1100 видами (более 3500 тысяч образцов).

В литературе также подробно описываются микологические коллекции Югорского

государственного университета [65] и Чувашского национального музея [66], Центрального Сибирского ботанического сада СО РАН [67], Ботанического института им. В.Л. Комарова в г. Санкт-Петербурге [68].

Сохраняются не только фунгариумы прошлых лет, но они постоянно обновляются и создаются новые. Например, в 2003 г. заложили коллекцию нелихенизированных грибов в Государственном музее природы в г. Карлсруэ (Германия), которая насчитывает более 45000 образцов [62]. В данном случае значение коллекции связывают с возможностью частых заимствований для исследовательских проектов, связанных с морфологией и таксономией, молекулярной таксономией, филогенией и экологией.

Подобные микологические коллекции, как и обычные гербарии, – неисчерпаемый источник генетического материала, так как в них содержатся образцы со значительным количеством неизвестных или недостаточно изученных филогенетических линий [57]. Изучение представителей фунгариумов позволяет постоянно проводить обновление классификации филумов Fungi и Mucoromycetes. Данные коллекции выступают в качестве основных носителей ДНК для изучения биоразнообразия, филогении, таксономии, филогеографии грибов [63].

Подходы, применяемые при изучении фунгариумных микро- и макромицетов, первоначально опирались только на традиционные морфологические описания и их фенотипические характеристики [69]. Подобные методы систематики были общепринятыми, использовались и используются до сих пор при изучении грибов [70].

В настоящее время, помимо морфологических приёмов, используется совокупность методов, которые включают, кроме фенотипических характеристик, генотипические, физиологические, хемотаксономические [70]. Так, геномный подход стал основой пересмотра принадлежности к определённому виду отдельных представителей микобиоты.

Наличие в фунгариумах не только сапрофитов, но и паразитов, даёт возможность изучения эволюции патогенов, изменения их пищевой предпочтительности, особенно с использованием методов выделения ДНК из коллекционных образцов [71].

Детальное исследование фунгариумных паразитов проводится во Всероссийском НИИ защиты растений, где имеется коллекция фомоидных грибов, паразитирующих

на растениях семейства Астровые, образцы которой были собраны на территории России и стран бывшего СССР с 1895 по 1960 гг. Самый старый образец на момент исследования имел возраст 124 года [71]. В данной работе было показано, что в результате длительного хранения морфологические структуры в большинстве случаев разрушаются, что не позволило получить достоверную информацию для корректной идентификации грибов. В то же время с помощью молекулярно-генетических методов, основанных на методе полимерной цепной реакции (ПЦР), стало возможным определить до рода 9 образцов из 18 и столько же до уровня вида. Видовая идентификация по молекулярным маркерам и морфологическим признакам совпала только для 124-летнего образца *Boeremia exigua*, который является на настоящий момент самым старым в мире образцом фомоидного гриба, ДНК которого была успешно выделена и амплифицирована.

Особое место в гербариях и, соответственно, в фунгариумах принадлежит микоризным грибам. Известно, что подземные сообщества, особенно грибные симбионты, играют важную роль в ответах экосистемы на глобальные изменения факторов внешней среды: повышение температуры, концентрации атмосферного CO₂, влажности, почвенной кислотности, содержания минеральных элементов в почве [72–77].

Отсутствие исторических обоснованных данных ограничивает понимание длительной реакции подземных сообществ на глобальные изменения. Этот пробел как раз могут восполнить гербарные образцы, обеспечивающие необходимое понимание происходящих генетических изменений, например, на уровне арбускулярной микоризы, для чего необходимо извлечение ДНК, которую экстрагируют из заражённых корней растений [63]. Это тем более важно, что арбускулярные микоризные грибы заражают до 74% лесных растений [78]. В частности, для её извлечения используются образцы различных видов растений и различного гербарного срока хранения. Так, одно из наиболее детальных исследований было проведено с четырьмя видами лесных растений: ариземой трёхлистной (*Arisaema triphyllum*), майником кистистым (*Maianthemum racemosum*), триллиумом прямостоячим (*Trillium erectum*) и триллиумом крупноцветковым (*T. grandiflorum*), гербаризированных на территории западной Пельсивании (США) в период с 1881 по 2008 гг. [63]. Из 48 исследованных фунгариумных микоризо-арбускулярных

грибов удалось извлечь ДНК у 21 образца, т. е. в 44% случаев, и они существенно отличались друг от друга у разных видов растений. Однако внутри одного вида растений таких различий в ДНК грибов у проб, отобранных в различные годы, не выявлено.

Таким образом, в ходе проведённых исследований была доказана возможность извлечения грибной ДНК из высушенных образцов длительного срока хранения (до 137 лет). Эти результаты предполагают утилитарное использование гербарных образцов для ретроспективного анализа корневых грибных симбионтов и для более детального исследования в будущем при определении возможных генетических изменений в организмах под влиянием природных и антропогенных факторов.

Помимо арбускулярной микобиоты, большую роль в жизни растений играют эндофитные грибы, которые очень часто можно обнаружить в листовых тканях у большинства обследованных растений, очень часто без видимых признаков болезни [79, 80]. Более того, постепенно всё более положительно оценивают роль эндофитных грибов в смягчении для растений неблагоприятных факторов внешней среды [81–85]. Обилие и видовое разнообразие эндофитных грибов обеспечивает возможность изучения в динамике экологии грибов и растений в меняющемся мире [86]. Однако об исторической связи и специфике подобных растительно-грибных ассоциаций эндофитных грибов с растениями известно пока сравнительно мало.

Изучение эндофитной микобиоты с привлечением трёх методов анализа (культурального, клонирования и секвенирования) проводили с использованием таких представителей бореальной биоты, как розмарин болотный (*Andromeda polifolia*) и багульник болотный (*Ledum palustre*) [87]. Было исследовано наличие эндофитных грибов, которые бессимптомно могут находиться в листовых тканях растений в свежих гербарных образцах и образцах четырёхлетней давности. Применяемые методики позволяли отделять эндофитные грибы от поверхностных. Было показано, что культуральный метод самый неэффективный для выделения грибов-эндофитов. В то же время методы клонирования и особенно секвенирования обеспечивают максимальное извлечение эндофитных грибов из исследуемых растительных тканей, и гербарные образцы весьма перспективны для изучения различных особенностей экологии как грибов, так и растений в историческом аспекте [87].

Рассматриваются три направления подобных исследований. Первое направление связано с изучением биоразнообразия эндофитных грибов в гербариях различного срока давности с растениями из различных местообитаний. Второе направление обусловлено тем, что в данной работе исследовали только два вида растений с максимальным четырёхлетним сроком гербаризации. Поэтому в дальнейшем авторы предполагают исследовать подобные растительно-грибные ассоциации гербариев предыдущих лет. И третье направление обусловлено необходимостью более строгого контроля за состоянием эндофитной микрофлоры живых растений и гербарных образцов.

Таким образом, наличие специфических высушенных коллекций грибов, получивших название фунгариумы, представляет огромную ценность в изучении грибов прошлых эпох и нашего времени в самых различных аспектах.

Геномный анализ гербарных и фунгариумных образцов

Современный уровень молекулярно-генетических подходов (генотипирование, секвенирование и др.) даёт возможность анализировать огромное количество растительных образцов для выявления полиморфизма, молекулярных основ фенотипической изменчивости, устойчивости к стрессовым воздействиям различных факторов внешней среды и, в конечном итоге, к созданию банков ДНК, интегрированных с гербарными коллекциями [88].

Любой высушенный растительный, грибной или бактериальный материал определённое количество лет сохраняет целостно или частично тот генофонд, который в предыдущие столетия и десятилетия не был востребован. Разработка и применение метода выделения ДНК из гербарных образцов значительно увеличило ценность гербариев как источника материала для установления молекулярной филогении данных объектов [89]. Благодаря новым технологиям извлечения ДНК, особенно с использованием высокопроизводительных методов секвенирования нового поколения (NGS) гербарии и фунгариумы становятся интересным объектом и для генетических исследований, пока ещё недостаточно оценённым. Это даёт возможность использования старинных гербариев и современных сборов для различных целей, например, для сравнения генотипа одних и тех же раститель-

ных популяций, сборы которых проводились в различные исторические периоды, но в одних и тех же локациях [18]. Включение исторических гербарных образцов в генетический анализ позволяет также лучше оценить изменения в параметрах нуклеотидных последовательностей [90].

Современные технологии позволяют выделять целые молекулы ДНК или(и) их фрагменты, которые сохраняются в гербарном материале неопределённо долгое количество лет. Методики выделения ДНК постоянно совершенствуются. Это приводит к тому, что даже сильная фрагментация молекул нуклеиновой кислоты не становится препятствием для получения определённого количества генетического материала, с помощью которого можно решить многочисленные задачи.

Однако при извлечении генетического материала необходимо учитывать, что в гербарных образцах содержится ДНК не только растений, но также грибов и бактерий. Эти микробы могут быть прижизненными патогенами растений или ассоциированными с ними в ходе симбиотических отношений, а также появляться при постмортальной колонизации, осуществляя разложение растений, или попадающие в ходе подготовки образцов к хранению. В одном из исследований при определении метагеномного профиля таких растений, как амброзия полыннолистная (*Ambrosia artemisiifolia*) и резуховидка Таля (*Arabidopsis thaliana*) 180-летнего срока хранения по ДНК удалось идентифицировать и представителей микробиоты, включая гриб *Alternaria alternata*, чья доля в секвенированном материале доходила до 7% [18]. В целом, гербарные образцы арабидопсиса и амброзии содержали значительно меньше эндогенной ДНК, чем свежие образцы, что, вероятно, связано с включением в геномный контент микробной ДНК. Из метагеномного профиля при изучении всех образцов была выявлена принадлежность ДНК к 205 различным видам. К сожалению, определить время контаминации растений данным грибом (т. е. прижизненное сожительство или попадание в процессе подготовки образцов к хранению или непосредственно при хранении), не удалось. В то же время молекулярно-генетические исследования сопряжены с рядом методических трудностей, связанных с тем, что изменения ДНК могут быть вызваны различными причинами и факторами, связанными как с гербаризацией растений, так и с длительностью их хранения [13].

Ещё одно исследование по амброзии с привлечением метаданных 1200 гербарных образцов, собранных во Франции и в других европейских странах, показало время появления этого сорняка в Европе и пути его интродукции, связанные с завозом из США в конце XIX века [91]. Историю интродукции батата (*Ipomoea batatas*) изучали путём сравнения 1245 гербарных современных и старинных образцов, собранных с XVII до начала XIX веков в различных частях Южной и Центральной Америки и Океании, включая Полинезию [92]. Геномный анализ исторических гербариев показал, что интродукция батата в Полинезию из Южной Америки произошла ещё в доколумбовские времена.

Историю интродукции картофеля (*Solanum tuberosum*) в Европу восстановили по изучению его гербарных образцов из 11 европейских гербариев, собранных с 1700 по 1910 гг., и было установлено, из каких регионов Южной Америки он был завезён [93].

Особое значение исторические гербарии имеют для изучения совместной эволюции растений и патогенов, часто становящихся причиной эпифитотий [94]. Исследования патогенов на гербарных образцах, собранных в разных регионах и в разные периоды, помогает устанавливать пути распространения инфекций. Так, например, было проведено детальное исследование *Phytophthora infestans*, начиная с гербарного образца картофеля 1845 г., т. е. времени первой эпифитотии фитофтороза в Северной Европе. При этом удалось выявить различающиеся геномы штаммов фитофторы, сохранившихся на исторических гербарных образцах и штаммов из современных изолятов патогена.

Однако, несмотря на успехи молекулярно-генетического подхода к изучению гербарных образцов, возникает ряд методических трудностей, на которых акцентируется внимание в обзоре [13]. Среди подобных трудностей авторы обзора выделяют следующие. В тканях гербарных образцов возможны деструктивные процессы, ведущие к фрагментации молекул ДНК и к различным повреждениям, ингибирующим работу ферментов-полимераз. При этом существуют разные причины изменения ДНК на первых и последующих стадиях гербаризации. Гербаризация вызывает гибель клеток, связанную с обезвоживанием и повышенной температурой, что и становится одной из причин фрагментации ДНК. При гербаризации и в процессе хранения часто производится обработка различными веществами, порой

смесью этанола и метанола, формалином, хлороформом, что также приводит к деградации ДНК. Степень деградации ДНК определяется возрастом гербарных образцов.

Подобные сложные моменты удаётся преодолевать с привлечением методов секвенирования нового поколения (NGS), поскольку при данном методе используются в качестве матрицы не протяжённые интактные молекулы ДНК, а её короткие фрагменты.

NGS-анализ гербарной ДНК в настоящее время начинают использовать для изучения генетической структуры популяций, изменения дрейфа генов внутри популяции, решения спорных вопросов филогении растений разных семейств [13].

Микробиота гербарных образцов и перспективы её использования

Микроорганизмы, связанные при жизни растения с его надземной и подземной частями, формирующие микробиоту филлосферы, в определённых количествах сохраняются и при высушивании растений на гербарных образцах. Хотя большинство микроорганизмов гибнет в процессе сушки растений при гербаризации, все-таки некоторые их виды (особенно спорообразующие бактерии), сорбируясь на подходящих носителях, способны сохранять свою жизнеспособность [95, 96].

Большое разнообразие микробиоты живых растений и сохранившейся при высушивании несёт определённую информацию об эволюции и биогеографии, а также специфике растительно-микробных ассоциаций [97–99]. Изучение и выделение гербарных микроорганизмов позволяет также устанавливать их филогенетическое и функциональное разнообразие в аспекте фенологических факторов и факторов временного изменения условий внешней среды [100, 101].

В последние десятилетия получила распространение теория холобионта, которая рассматривает многоклеточное растение как единицу биологической организации: многоклеточное растение и его микробиота (вирусы, археи, бактерии, грибы, протисты, ассоциированные с данным растением в данное время) [95, 102]. Микробы могут быть ткане- или органоспецифическими, живущими на поверхности или в тканях растительных органов, включая фитопатогенов [50].

При выделении подобных микроорганизмов используются различные приёмы, в том числе классические методы посева смывов

с гербарных образцов на селективные питательные среды. Подобная методика позволяет одновременно определить численность микроорганизмов на единицу гербарной массы или гербарной площади (например, листьев или таллома водорослей), а также проводить определение и выделение в чистую культуру отдельных видов, сравнить численность эпифитной и ризосферной микрофлоры высших растений.

В частности, была проведена серия работ по определению состава и численности микроорганизмов гербарных образцов морских водорослей и высших растений, гербаризированных в конце XIX – начале XX веков, которые сохранились на кафедре биологии растений, селекции и семеноводства, микробиологии Вятского ГАТУ [103–105].

Так, установлено, что жизнеспособные клетки бактерий-аммонификаторов сохранились на поверхности всех изучаемых бурых водорослей (*Ascophyllum nodosum*, *Fucus vesiculosus*, *Laminaria digitata*). Среди выделенных бактерий явное доминирование принадлежит представителям р. *Bacillus*, в частности, *B. mesentericus*.

Серии аналогичных опытов были проведены с растениями из семейства Ranunculaceae (Лютиковые), собранных и гербаризированных в 1899 г.: прострел раскрытый (*Pulsatilla patens*), лютик ядовитый (*Ranunculus sceleratus*), лютик золотистый (*R. auricomus*). В пределах одного семейства наблюдается существенный разброс в количественном обилии различных физиологических групп микробов. Наименее обильна ризосферная микрофлора прострела, наиболее – лютика ядовитого. В ризосфере лютика ядовитого доминировали микромицеты (свыше 87% от общей численности микробов), прострела раскрытого – аммонификаторы (более 70%), лютика золотистого – азотфиксаторы (55%).

Определение численности эпифитной и ризосферной микробиоты проводили также, используя гербарные образцы птицемлечника зонтичного (*Ornithogalum umbellatum*), подлесника европейского (*Sanicula europaea*), гвоздики (*Dianthus*). Полученные результаты оказались ниже тех, которые обычно наблюдаются при учёте численности микроорганизмов со свежееизъятых из почвы растений. Численность эпифитной микробиоты у трёх видов гербарных образцов различных семейств оказалась примерно одинаковой. Для эпифитных группировок у разных растений наблюдается три варианта структурной организации: па-

ритетное представительство бактерий и грибов у птицемлечника зонтичного (50%), доминирование грибов у подлесника европейского (61%) и доминирование бактерий у гвоздики (61%) [103–105].

Для ризосферной микробиоты разброс численности бактерий оказался существенно выше, чем у эпифитов. Максимальная численность отмечена для ризосферной микробиоты птицемлечника зонтичного, а минимальная численность наблюдалась у гвоздики. У ризосферных микроорганизмов в структуре популяции птицемлечника зонтичного наблюдается самое массовое развитие бактерий (78%) по сравнению с микромицетами (22%), с абсолютным преобладанием бактерий рода *Bacillus*. Преобладание бактерий характерно и для гвоздики (67%). У подлесника европейского одинаковое представительство бактерий и грибов (50%), преимущественно р. *Trichoderma*.

Микробы, входящие в состав «дремлющей» микробиоты гербариев и выделенные в чистую культуру, можно использовать в нескольких направлениях: изучать как давние компоненты над- и подземных органов растений; проводить сравнение с современной эпифитной и ризосферной микробиотой; использовать в качестве тест-организмов на определённые поллютанты, включая новые, которые появились сравнительно недавно и которых не было в момент сбора растений и формирования из них гербария; а также изучить их антагонистические возможности против различных видов патогенов.

Так, культуры бацилл (*Bacillus mesentericus* и *Bacillus* sp.) из образцов бурых водорослей использовали для определения токсичности такого синтетического поверхностно-активного вещества (СПАВ), как лаурил сульфат натрия (ЛСН) [106]. Внесение ЛСН в питательную среду привело к резкому снижению численности бацилл. Сила угнетающего эффекта ЛСН на оба штамма бацилл увеличивалась с увеличением концентрации поллютанта: для *B. mesentericus* в 407 раз в варианте при внесении 2 расчётных доз (р. д.) и для *Bacillus* sp. в 19,6 раз при 0,5 р. д. Полное прекращение роста бацилл наблюдалось при 4 р. д. для *B. mesentericus*. Чувствительность *Bacillus* sp. к данному поллютанту была намного сильнее: полное подавление роста наступало уже при 1 р. д. ЛСН. Таким образом, поддержание в музейной культуре данных штаммов бацилл позволит успешно использовать их как тест-организмы на различные виды СПАВ, в состав которых входит ЛСН.

В литературе описаны и другие многочисленные примеры практического использования гербарной микробиоты. Микробные сообщества или отдельные виды микроорганизмов, изолированные с гербарных образцов, позволяют манипулировать с ними, в определённой степени используя их в сельскохозяйственной практике, создавая препараты, заменяющие, в частности, пестициды. Так, различные виды грибов рода *Trichoderma* обладают ингибирующей активностью в отношении фитопатогенных грибов, а также антимикробной активностью, что служит основанием использования различных видов триходермы в биотехнологии для выпуска биопрепаратов (триходермин, трихозан, глиокадин), используемых в сельскохозяйственной практике как биопестициды для предотвращения инфекционных заболеваний [107].

Показана высокая степень антагонистической активности гриба *Trichoderma* sp., выделенного из ризосферной почвы лютика ядовитого (*Ranunculus celeratus*) по отношению к фитопатогенным грибам *Fusarium culmorum* и *F. oxysporum*, вследствие чего данный штамм триходермы в перспективе может служить ингибитором развития фузариозов [108, 109].

Гербарии являются ещё и источником патогенных микроорганизмов, например, фитопторы, выделенной с корней гербаризированных образцов картофеля [94, 110], что позволяет более глубоко и подробно изучать коэволюцию патогенов и их хозяев.

Образцы инфицированных цитрусовых привели к выявлению путей распространения рака этих растений, вызванных *Xanthomonas axonopodis* [111]. Данное заболевание с середины XIX века отмечали в Индии и на Яве, затем произошло распространение патогена в Саудовскую Аравию, Иран, Флориду. По историческим гербарным образцам установлены как географическое распространение, так и генетическая изменчивость.

Не только микробиота гербариев представляет интерес в биотехнологическом плане. Так, определяли антагонистическую активность тропической лианы *Combretum erythrophllum* из коллекционных образцов 92-летнего возраста и сравнивали с вытяжками из свежих листьев [112]. Испытания проводили на культурах бактерий *Staphylococcus aureus*, *Enterococcus faecalis*, *Escherichia coli* и *Pseudomonas auruginosa*. Было показано, что состав химических компонентов и их биологическая активность практически не изменились за столетний период нахождения комбретума

в высушенном состоянии. Подобное исследование гербарного материала может быть полезным для скрининга растений со стабильной биологической активностью компонентов или для создания научной базы использования растений в традиционной медицине. Поиски альтернативных методов подавления патогенных микроорганизмов становятся всё более актуальными в связи с постоянно возрастающей устойчивостью микробов к применяемым антибиотикам. В частности, поиск эффективных антимикробных веществ, извлекаемых даже из гербарных образцов, приближает наступление постантибиотиковой эры.

Подобная антимикробная активность и сохранность биохимических компонентов обнаружена также у гербарных образцов базилика американского (*Ocimum americanum*) [113]. Водные, ацетоновые, этилацетатные и метаноловые экстракты базилика применяли против нескольких видов бактерий и микромицетов: *Bacillus cereus*, *Clostridium penfringens*, *Klebsiella pneumoniae*, *Salmonella paratyphi*, *Candida albicans* и *Aspergillus niger*. Во всех случаях отмечали высокую антагонистическую активность базиликовых экстрактов против всех тестируемых микроорганизмов. Химический анализ гербарных образцов выявил в них наличие алкалоидов, стероидов, сапонинов, флавоноидов, танинов, терпенов, фенольных компонентов, сердечных гликозидов. Таким образом, *Ocimum americanum* можно рассматривать как потенциальный источник биологически активных веществ, подавляющих развитие патогенов, в качестве альтернативы антибиотикам.

Интересные исследования были проведены по изучению биохимического состава четырёх видов грибов (высушенных и свежих) *Kuehnmomyces mutabilis*, *K. lignicola*, *Hypholoma carpoides*, *H. fascioclare* [114]. Идентифицировали 25 метаболитов, при этом не было найдено существенных различий между высушенными и свежими образцами грибов различных возрастов. Основное отличие было только в содержании таких кислот, как фумаровая и малоновая, которые преобладали в свежих грибах. Общее содержание жиров и аминокислот было несколько выше в высушенных образцах.

Однако в гербарных образцах сохраняются не только полезные биологически активные вещества, но и токсины. В 87% исследованных образцов гербарных цианобактерий, собранных в период с 1839 по 1950 гг., был обнаружен токсин микроцистин и выделен ген, ответ-

ственный за его синтез [115]. Таким образом, старинные коллекции высушенных образцов различных видов токсинообразующих цианобактерий служат потенциальным ресурсом для изучения исторического и географического их распространения и использования архивных цианобактерий для ретроспективного анализа экотоксикологических локаций данных организмов.

Заключение

Мировые коллекции растений и грибов (гербарии и фунгарии), создаваемые с XVI века, являются большим научным достоянием. Они включают десятки миллионов образцов растений и грибов различных семейств, родов и видов вместе с микробиотой (бактериями и грибами), обитающей на их поверхности, а также с микробами-эндофитами и микробами-паразитами.

Большая ценность гербариев и фунгариев заключается и в том, что они позволяют изучать биогеографию, возникшие эволюционные и экологические изменения, популяционную генетику растений и грибов. На примере сохранившихся гербарных образцов возможно устанавливать климатические изменения, изменения химического состава воды и почвы, действие поллютантов, антропогенные преобразования природных экосистем. Появление геномного анализа привело к выделению из гербарных образцов целых молекул ДНК или их фрагментов, которые также позволяют решить задачи возникновения и распространения по континентам отдельных видов растений и распространения эпифитотий.

Выделенные из гербарных образцов микроорганизмы служат источником тест-организмов и основой биопрепаратов многофункционального действия.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Структура и состояние компонентов техногенных экосистем подзоны южной тайги», номер государственной регистрации в ЕГИСУ № 122040100032-5.

References

1. Rivers M., Taylor L., Brummitt N., Meagher T., Roberts D., Lughadh E. How many herbarium specimens are needed to detect threatened species? // Biol. Conserv. 2011. V. 144. No. 10. P. 2541–2547. doi: 10.1016/j.biocon.2011.07.014

2. Nualart N., Ibanez N., Lague P., Pedrol Y., Vilar L., Guardia R. Dataset of herbarium specimens of threatened vascular plants in Catalonia // *PhytoKeys*. 2017. V. 77. P. 41–62. doi: 10.3897/phytokeys.77.11542
3. Besnard G., Gaudeul M., Lavergne S., Muller S., Rouhan G., Sukhorukov A., Vanderpoorten A., Jabbour F. Herbarium-based science in the twenty-first century // *Botany Letters*. 2018. V. 165. No. 3–4. P. 323–327. doi: 10.1080/23818107.2018.1482783
4. Bakker F., Bieker V., Martin M. Editorial: herbarium collection-based plant evolutionary genetics and genomics // *Front. Ecol. Evol.* 2020. V. 8. Article No. 603948. doi: 10.3389/fevo.2020.603948
5. Index herbarium: a global directory of public herbaria and associated staff. New York Botanical Garden's Virtual Herbarium [Internet resource] <http://sweetgum.nybg.org/science/ih/> (Accessed: 16.02.2023).
6. Heberling J., Burke D. Utilizing herbarium specimens to quantify historical mycorrhizal communities // *Appl Plant Sci*. 2019. V. 7. Article No. e01223. doi: 10.1002/aps3.1223
7. Shtina E.A., Gollerbakh M.M. Soil algae ecology. Moskva: Nauka, 1976. 143 p. (in Russian).
8. Domracheva L.I., Kovina A.L., Malinina A.I., Vakhmyanina S.A., Sheshegova T.K. Ancient herbariums as a source of “sleeping” microflora // Soil reclamation for sustainable development of agriculture: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 100-letiyu so dnya rozhdeniya professora A.F. Timofeeva. Part 1. Kirov: Vyatka State Agricultural Academy, 2019. P. 149–156 (in Russian).
9. Wandeler P., Hoeck P.E., Keller L.F. Back to the future: museum specimens in population genetics // *Trends in Ecology & Evolution*. 2007. V. 22. No. 12. P. 634–642. doi: 10.1016/j.tree.2007.08.017
10. Pyke G., Ehrlich P. Biological collections and ecological/environmental research: a review, some observations and a look to the future // *Biol Rev Camb Philos Soc*. 2010. V. 85. No. 2. P. 247–66. doi: 10.1111/j.1469-185X.2009.00098
11. Burns K.C., Herold N., Wallace B. Evolutionary size changes in plants of the south-west Pacific // *Global Ecology & Biogeography*. 2012. V. 21. No. 8. P. 819–828. doi: 10.1111/j.1466-8238.2011.00730.x
12. Primack D., Imbres C., Primack R., Miller-Rushing A., Del Tredici P. Herbarium specimens demonstrate earlier flowering times in response to warming in Boston // *American Journal of Botany*. 2004. V. 91. No. 8. P. 1260–1264. doi: 10.3732/ajb.91.8.1260
13. Fomina N.A., Antonova O.Yu., Chukhina I.G., Gavrilenko T.A. Herbarium collections in molecular genetic research // *Turczaninowia*. 2019. V. 22. No. 4. P. 104–118 (in Russian). doi: 10.14258/turczaninowia.22.4.12
14. Funk V. 100 Uses for a herbarium (well and least 72) // *American Society of Plant Taxonomists Newsletter*. 2003. V. 17. No. 2. P. 17–19.
15. Mason H.J., Isaak B.L. Herbarium specimens as exaptations: new uses for old collections // *American Journal of Botany*. 2017. V. 104. No. 7. P. 963–965. doi: 10.3732/ajb.1700125
16. Joye D.A., Castella E., Lachvanne J.B. Occurrence of Characeae in Switzerland over the last two centuries (1800–2000) // *Aquatic Botany*. 2002. V. 72. No. 3. P. 369–385. doi: 10.1016/S0304-3770(01)00211-x
17. Van de Paer C., Hong-Wa C., Jeziorski C., Besnard G. Mitogenomics of *Hesperelaea*, an extinct genus of Oleaceae // *Gene*. 2016. V. 594. No. 2. P. 197–202. doi: 10.1016/j.gene.2016.09.007
18. Bieker V.C., Martin M.D. Implications and future prospects for evolutionary analyses of DNA in historical herbarium collections // *Botany Letters*. 2018. V. 165. No. 3–4. P. 409–418. doi: 10.1080/23818107.2018.1458651
19. Fuller D.Q., Murphy C. The origin and early dispersal of horsegram (*Macrotyloma uniflorum*), a major crop of Ancient India // *Genetic Resources and Crop Evolution*. 2018. V. 65. No. 1. P. 285–305. doi: 10.1007/s10722-017-0532-2
20. Corney D., Clark J.Y., Tang H.L., Wilkim P. Automatic extraction of leaf characters from herbarium specimens // *Taxon*. 2012. V. 61. No. 1. P. 231–244. doi: 10.1002/tax.611016
21. Lavoie C. Biological collections in an ever changing world: herbaria as tools for biogeographical and environmental studies // *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*. 2013. V. 15. No. 1. P. 68–76. doi: 10.1016/j.ppees.2012.10.002
22. Meineke E.K., Davis C.C., Davies T.J. The unrealized potential of herbaria for global change biology // *Ecological Monographs*. 2018. V. 88. No. 4. P. 505–525. doi: 10.1002/ecm.1307
23. Willis C., Ellwood E., Primack R., Davis C., Pearson K.D., Gallinat A.S., Yost J.M., Nelson G., Mazer S.J., Rossington N.L., Sparks T.H., Soltis P.S. Old plants, new tricks: phenological research using herbarium specimens // *Trends. Ecol. Evol.* 2017. V. 32. No. 7. P. 531–546. doi: 10.1016/j.tree.2017.03.015
24. Skvortsov A.K. Herbarium. A guide to methodology and technology. Moskva: Nauka, 1977. 199 p. (in Russian).
25. Gureeva I.I. The size and distribution of the Russian herbarium fund // Problems of studying the vegetation cover of Siberia: Materialy IV Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy 125-letiyu Gerbariya im. P.N. Krylova Tomskogo gosudarstvennogo universiteta i 160-letiyu so dnya rozhdeniya P.N. Krylova. Tomsk: Tomsk University Press, 2010. P. 16–18 (in Russian).
26. Nualart N., Ibanez N., Luque P., Pedrol J., Vilar L., Guardia R. Dataset of herbarium specimens of threatened vascular plants in Catalonia // *PhytoKeys*. 2017. V. 77. No. 2. P. 41–62. doi: 10.3897/phytokeys.77.11542
27. Bolmgren K., Lönnberg K. Herbarium data reveal an association between fleshy fruit type and earlier flowering time // *International Journal of Plant Sciences*. 2005. V. 166. No. 4. P. 663–670. doi: 10.1086/430097
28. Loiselle B., Jørgensen P., Consiglio T., Blake J.G., Lohmann L.G., Montiel O.M. Predicting species distri-

butions from herbarium collections: does climate bias in collection sampling influence model outcomes? // *Journal Biogeography*. 2008. V. 35. No. 1. P. 105–116. doi: 10.1111/j.13652699.2007.01779.x

29. Feeley K.Y., Silman M.R. The data void in modeling current and future distributions of tropical species // *Global Change Biology*. 2011. V. 17. No. 1. P. 626–630. doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02239.x

30. Park I. Digital herbarium archives as a spatially extensive, taxonomically discriminate phenological record; a comparison to MODIS satellite imagery // *Int J Biometeorol*. 2012. V. 56. P. 1179–1182. doi: 10.1007/s00484-012-0521-2

31. Lavole C. Biological collections in an ever changing world: Herbaria as tools for biogeographical and environmental studies // *Perspectives in Plant Ecology Evolution and Systematics*. 2013. V. 15. No. 1. P. 68–76. doi: 10.1016/j.ppees.2012.10.002

32. Maroyi A. Traditional uses of wild and tended plants in maintaining ecosystem services in agricultural landscapes of the Eastern Cape Province in South Africa // *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*. 2022. V. 18. No. 1. P. 1–20. doi: 10.1186/s13002-022-00512-0

33. Kistler L., Vanessa C., Martin M., Pedersen M., Madrigal J., Ancient N. Plant genomics in archaeology, herbaria, and the environment // *Annual Review of Plant Biology*. 2020. V. 71. P. 605–629. doi: 10.1146/annurev-arplant-081519-035837

34. Lang P., Willems F., Scheepens J., Burbano H., Bossdorf O. Using herbaria to study global environmental change // *New Phytologist*. 2019. V. 221. No. 1. P. 110–122. doi: 10.1111/nph.15401

35. Holmes M.W., Hammond T.T., Wogan G.O.U., Walsh R.E., LaBarbera K., Wommack E.A., Martins F.M., Crawford Y.C., Mack K.L., Bloch L.M., Nachman M.W. Natural history collections as windows on evolutionary processes // *Molecular Ecology*. 2016. V. 25. No. 4. P. 864–881. doi: 10.1111/mec.13529

36. Rudin S.M., Murray D.W., Whitfield T.J.S. Retrospective analysis of heavy metal contamination in Rhode Island based on old and new herbarium specimens // *Applications in Plant Sciences*. 2017. V. 5. No. 1. Article No. 1600108. doi: 10.3732/apps.1600108

37. Arnold B.J., Lahner B., DaCosta J.M., Weisman C.M., Hollister J.D., Salt D.E., Bomblies K., Yant L. Borrowed alleles and convergence in serpentine adaptation // *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*. 2016. V. 113. No. 29. P. 8320–8325. doi: 10.1073/pnas.1600405113

38. Dynarski K., Houlton B. Nutrient limitation of terrestrial free-living nitrogen fixation // *New Phytol*. 2018. V. 217. No. 3. P. 1050–1061. doi: 10.1111/nph.14905

39. Pedicino L.C., Leavitt S.W., Betancourt Y.L., Van de Water P.K. Historical variations in $\delta^{13}C_{LEAF}$ of herbarium specimens in the Southwestern U.S. // *Western North American Naturalist*. 2002. V. 62. No. 3. P. 348–359.

40. Hallingbäck T. The effect of air pollution on mosses in southern Sweden // *Biological Conservation*. 1992. V. 59. No. 2–3. P. 163–170. doi: 10.1016/0006-3207(92)90577-A

41. Case M.A., Flinn K.M., Jancaitis J., Alley A., Paxton A. Declining abundance of American ginseng (*Panax quinquefolius* L.) documented by herbarium specimens // *Biological Conservation*. 2007. V. 134. No. 1. P. 22–30. doi: 10.1016/j.biocon.2006.07.018

42. Pauw A., Hawkins J.A. Reconstruction of historical pollination rates reveals linked declines of pollinators and plants // *Oikos*. 2011. V. 120. No. 3. P. 344–349. doi: 10.1111/j.1600-0706.2010.19039.x

43. Feeley K.Y., Hurtado Y., Saatchi S., Silman M.R., Clark D.B. Compositional shifts in Costa Rican forests to climate-driven species migrations // *Global Change Biology*. 2013. V. 19. No. 11. P. 3472–3480. doi: 10.1111/gcb.12300

44. Magona N., Richardson D.M., Le Roux J.J., Kritzinger-Klopper S., Wilson J.R.U. Even well-studied groups of alien species might be poorly inventoried: Australian Acacia species in South Africa as a case study // *NeoBiota*. 2018. V. 39. P. 1–29. doi: 10.3897/neobiota.39.23135

45. Pouličková A., Hájková P., Kintrová K., Bat'ková R., Czudková M., Hájek M. Tracing decadal environmental change in ombrotrophic bogs using diatoms from herbarium collections and transfer function // *Environ Pollut*. 2013. V. 179. P. 201–209. doi: 10.1016/j.envpol.2013.04.007

46. Müller D.B., Vogel C., Bai Y., Vorholt J.A. The plant microbiota: systems-level insights and perspectives // *Annu Rev Genet*. 2016. V. 50. P. 211–234. doi: 10.1146/annurev-genet-120215-034952

47. Busby P., Soman C., Wagner M., Friesen M., Kremer J., Bennett A., Dangl J. Research priorities for harnessing plant microbiomes in sustainable agriculture // *PLoS Biology*. 2017. V. 15. No. 3. Article No. e2001793. doi: 10.1371/journal.pbio.2001793

48. Finkel O., Castrillo G., Paredes S., Gonzalez I., Dangl J. Understanding and exploiting plant beneficial microbes // *Current Opinion in Plant Biology*. 2017. V. 38. P. 155–163. doi: 10.1016/j.pbi.2017.04.018

49. Knief C. Analysis of plant microbe interactions in the era of next generation sequencing technologies // *Front. Plant Sci*. 2014. V. 5. Article No. 216. doi: 10.3389/fpls.2014.00216

50. Kido A., Hood M.E. Mining new sources of natural history observations for disease interactions // *Am. J. Bot*. 2020. V. 107. No. 1. P. 3–11. doi: 10.1002/ajb2.1409

51. Bruns E.L., Antonovics J., Hood M.E. Is there a disease-free halo at species range limits? The codistribution of anther-smut disease and its host species // *Journal of Ecology*. 2018. V. 107. No. 19. P. 1–11. doi: 10.1111/1365-2745.13009

52. Ristaino J., Groves C., Parra G. PCR amplification of the Irish potato famine pathogen from historic specimens // *Nature*. 2001. V. 411. P. 695–697. doi: 10.1038/35079606

53. Li W., Brlansky R.H., Hartung J.S. Amplification of DNA of *Xanthomonas axonopodis* pv. citri from historic citrus canker herbarium specimens // *Journal of Microbiol Methods*. 2006. V. 65. No. 2. P. 237–246. doi: 10.1016/j.mimet.2005.07.014

54. Alexander H.M., Price S., Houser R., Finch D., Tourtellot M. Is there reduction in disease and pre-dispersal seed predation at the border of a host plant's range? Field and herbarium studies of *Carex blanda* // Journal of Ecology. 2007. V. 95. No. 3. P. 446–457. doi: 10.1111/j.1365-2745.2007.01228.x
55. Andrew C., Diez J., James T.Y., Kauserud H. Fungarium specimens: a largely untapped source in global change biology and beyond // Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci. 2019. V. 374. No. 1763. Article No. 20170392. doi: 10.1098/rstb.2017.0392
56. Hawksworth D.L. Fungal diversity and its implications for genetic resource collections // Studies in Mycology. 2004. V. 50. No. 1. P. 9–18.
57. Volobuev S. Mycological collection of the Herbarium named after V.N. Khitrovo (ONHI) of the Oryol State University: traditional and modern approaches to organization // Uchonyye zapiski Orlovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Yestestvennyye, tekhnicheskiye i meditsinskiye nauki. 2010. No. 2. P. 105–110 (in Russian).
58. Hawksworth D. Mycobiota, mycota or funga? // Mycological Research. 2000. V. 104. Article No. 1283.
59. Hawksworth D. Monitoring and safeguarding fungal resources worldwide: the need for an international collaborative MycoAction Plan // Fungal Diversity. 2003. V. 13. P. 29–45.
60. Kovalenko A.E., Bondartseva M.A., Karatygin I.V., Melnik V.A., Novozhilov Yu.K., Popov E.S., Pystina K.S. The state of knowledge and assessment of the species diversity of fungi and myxomycetes in Russia // Fungi in natural and anthropogenic ecosystems: Trudy mezhdunarodnoy konferentsii, posvyashchennoy 100-letiyu nachala raboty profesora A.S. Bondartseva v Botanicheskom institute im. V.L. Komarova RAN. V. 1. Sankt-Petersburg: Boston Spectrum, 2005. P. 267–270 (in Russian). doi: 10.13140/2.1.1942.1127
61. Spooner B., Cannon P. World's largest collection of fungi held at Kew Gardens // Mycologist News. 2010. V. 1. P. 8–9.
62. Scholler M., Lutz M., Wood A.R., Hagedorn G., Mennicken M. Taxonomy and phylogeny of *Puccinia lagenophorae*: a study using rDNA sequence data, morphological and host range features // Mycological Progress. 2011. V. 10. P. 175–187. doi: 10.1007/s11557-010-0687-0
63. Heberling J., Burke D. Utilizing herbarium specimens to quantify historical mycorrhizal communities // Appl. Plant Sci. 2019. V. 7. No. 4. Article No. e01223. doi: 10.1002/aps3.1223
64. Melkumov G.M. Herbarium of macromycetes of the department of botany and mycology of Voronezh State University // Mycology and Phytopathology. 2018. V. 52. No. 3. P. 217–222 (in Russian).
65. Filippova N.V. The present state of the Yugra State University Fungarium // Ecological problems of the northern regions and ways to solve them: Tezisy dokladov VII Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoy 30-letiyu Instituta problem promyshlennoy ekologii Severa FITs KNTs RAN i 75-letiyu so dnya rozhdeniya doktora biologicheskikh nauk, professora V.V. Nikonova / Eds. E.A. Borovicheva, O.I. Vandysch. Apacity: Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, 2019. P. 270–272 (in Russian).
66. Davydova T.A., Yakovlev V.A., Mihecheva E.N. Mycological herbarium of the Chuvash National Museum, donated by F.V. Fedorov // Estestvennonauchnye issledovaniya v Chuvashii i sopredelnykh regionakh. 2023. No. 9. P. 150–162 (in Russian).
67. Naumenko Yu.V., Gorbunova I.A., Vlasenko V.A., Vlasenko A.V. Mycological herbarium of the Central Siberian Botanical Garden SB RAS. History and prospects of development // Rastitelnyy mir Aziatskoy Rossii: Vestnik Tsentralnogo sibirskogo botanicheskogo sada SO RAN. 2018. No. 1 (29). P. 100–104 (in Russian). doi: 10.21782/RMAR1995-2449-2018-1(100-104)
68. Popov E.S. The types of fungal names published by Ch.G. Ehrenberg from A. von Chamisso's collection, and kept in the Mycological and Lichenological herbaria of the Komarov Botanical Institute (St. Petersburg, LE) // Novosti Sistematiki Nizshikh Rastenii. 2014. V. 48. P. 196–203. doi: 10.31114/nsnr/2014.48.196
69. Hawksworth D. Funga and fungarium // IMA Fungus. 2010. V. 1. Article No. 9. doi: 10.1007/BF03449321
70. Senanayake I.C., Pem D., Rathnayaka A.R., Wijesinghe S.N., Tibpromma S., Wanasinghe D.N., Phookamsak R., Kularathnage N.D., Gomdola D., Harishchandra D., Dissanayake L.S., Xiang M., Ekanayaka A.H., McKenzie E.H.C., Hyde K.D., Zhang H., Xie N. Predicting global numbers of teleomorphic ascomycetes // Fungal Diversity. 2022. V. 114. P. 1–42. doi: 10.1007/s13225-022-00504-1
71. Gomzhina M.M., Hannibal F.B. Isolation of DNA of pycnidial fungi-pathogens of plants from herbarium material // Modern solutions in the development of agricultural science and production: Mezhdunarodnyy sammit molodykh uchenykh. Krasnodar: IP Sinyaev Dmitry Nikolaevich, 2016. P. 24–27 (in Russian).
72. Allen M.F., Kitajima K., Hernandez R.R. Mycorrhizae and global change // Trees in a Changing Environment / Eds. M. Tausz, N. Grulke. Springer Science + Business Media Dordrecht, 2014. P. 37–59. doi: 10.1007/978-94-017-9100-7_3
73. Egerton-Warburton L.M., Allen E. Shifts in arbuscular mycorrhizal communities along an anthropogenic nitrogen deposition gradient // Ecological Applications. 2000. V. 10. No. 2. P. 484–496. doi: 10.1890/1051-0761(2000)010[0484:SI-AMCA] 2.0.CO;2
74. Treseder K.K. A meta-analysis of mycorrhizal responses to nitrogen, phosphorus, and atmospheric CO₂ in field studies // New Phytol. 2004. V. 164. No. 2. P. 347–355. doi: 10.1111/j.1469-8137.2004.01159.x
75. Kivlin S.N., Emery S.M., Rudgers J.A. Fungal symbionts alter plant responses to global change // Am. J. Bot. 2013. V. 100. No. 7. P. 1445–1457. doi: 10.3732/ajb.1200558
76. Wolf J., Johnson N.C., Rowland D.L., Reich P.B. Elevated CO₂ and plant species richness impact arbuscular mycorrhizal fungal spore communities // New Phytol.

2003. V. 157. No. 3. P. 579–588. doi: 10.1046/j.1469-8137.2003.00696.x

77. Bitsadze N., Beruashvili M., Pavliashvili K., Khazaradze R., Jorjadze A., Tchabashvili G., Shanidze S., Kobakhidze N. Main oak species and fungi associated with oak trees described in Georgian mycological herbarium // *Annals of Agrarian Science*. 2018. V. 16. No. 4. P. 432–435. doi: 10.1016/j.aasci.2018.06.004

78. Brundrett M. Mycorrhizal associations and other means of nutrition of vascular plants: understanding the global diversity of host plants by resolving conflicting information and developing reliable means of diagnosis // *Plant and Soil*. 2009. V. 320. No. 1. P. 37–77. doi: 10.1007/s11104-008-9877-9

79. Rodriguez R.J., White J.F.Jr., Arnold A.E., Redman R.S. Fungal endophytes: diversity and functional roles // *New Phytol.* 2009. V. 182. No. 2. P. 314–330. doi: 10.1111/j.1469-8137.2009.02773.x

80. Petrini O. Fungal endophytes of tree leaves // *Microbial Ecology of Leaves* / Eds. J.H. Andrews, S.S. Hirano. New York: Springer-Verlag, 1991. P. 179–197. doi: 10.1007/978-1-4612-3168-4_9

81. Bonos S.A., Wilson M.M., Meyer W.A., Funk C.R. Suppression of red thread in fine fescues through endophyte-mediated resistance // *Applied Turfgrass Science*. 2005. V. 2. No. 1. P. 1–7. doi: 10.1094/ATS-2005-0725-01-RS

82. Tanaka A., Tapper B.A., Popay A., Parker E.J., Scott B. A symbiosis expressed non-ribosomal peptide synthetase from a mutualistic fungal endophyte of perennial ryegrass confers protection to the symbiotum from insect herbivory // *Mol Microbiol.* 2005. V. 57. No. 4. P. 1036–1050. doi: 10.1111/j.1365-2958.2005.04747.x

83. Clarke B.B., White J.F.Jr., Hurley R.H., Torres M.S., Sun S., Huff D.R. Endophyte-mediated suppression of dollar spot disease in fine fescues // *Plant Dis.* 2006. V. 90. No. 8. P. 994–998. doi: 10.1094/PD-90-0994

84. Busby P.E., Ridout M., Newcombe G. Fungal endophytes: modifiers of plant disease // *Plant Molecular Biology*. 2016. V. 90. No. 6. P. 645–655. doi: 10.1007/s11103-015-0412-0

85. Dastogeer K.M.G., Li H., Sivasithamparam K., Jones M., Wylie S. Fungal endophytes and a virus confer drought tolerance to *Nicotiana benthamiana* plants through modulating osmolytes, antioxidant enzymes and expression of host drought responsive genes // *Environmental and Experimental Botany*. 2018. V. 149. P. 95–108. doi: 10.1016/j.envexpbot.2018.02.009

86. Peay K.G., Baraloto C., Fine P.V.A. Strong coupling of plant and fungal community structure across western Amazonian rainforests // *The ISME Journal*. 2013. V. 7. No. 9. P. 1852–1861. doi: 10.1038/ismej.2013.66

87. Daru B.H., Kling M.M., Meineke E.K., van Wyk A.E. Herbarium records reveal early flowering in response to warming in the southern hemisphere // *bioRxiv*. 2018. P. 1–28. doi: 10.1101/432765

88. Ryabushkina N.A., Omasheva M.E., Galiaparov N.N. Specifics of DNA extraction from plant objects // *Biotekhnologiya. Teoriya i praktika*. 2012. No. 2. P. 9–26 (in Russian).

nologiya. Teoriya i praktika. 2012. No. 2. P. 9–26 (in Russian).

89. Geltman D.V., Novozhilov Yu.K. They will be forever young: herbariums are the basis of a modern integrative approach to solving problems of phylogenetics, taxonomy and the study of genetic resources of plants and fungi // *Genetic resources of Russia: Sbornik tezisov plenarnykh dokladov i Nauchnogo foruma*. Moskva: Pero, 2022. P. 18 (in Russian).

90. Gutaker R.M., Reiter E., Furtwangler A., Schuenemann V.J., Burbano H.A. Extraction of ultrashort DNA molecules from herbarium specimens // *BioTechniques*. 2017. V. 62. No. 2. P. 76–79. doi: 10.2144/000114517

91. Chauvel B., Dessaint F., Cardinal-Legrand C., Bretagnolle F. The historical spread of *Ambrosia artemisiifolia* L. in France from herbarium records // *Journal of Biogeography*. 2006. V. 33. No. 4. P. 665–673. doi: 10.1111/j.1365-2699.2005.01401.x

92. Roullier C., Benoit L., McKey D.B., Lebot V. Historical collections reveal patterns of diffusion of sweet potato in Oceania obscured by modern plant movements and recombination // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2013. V. 110. No. 6. P. 2205–2210. doi: 10.1073/pnas.1211049110

93. Ames M., Spooner D.M. DNA from herbarium specimens settles a controversy about origins of the European potato // *American Journal of Botany*. 2008. V. 95. No. 2. P. 252–257. doi: 10.3732/ajb.95.2.252

94. Martin M.D., Cappellini E., Samaniego Y.A., Zepeda M.L., Campos P.F., Seguin-Orlando A., Wales N., Orlando L., Ho S.Y.W., Dietrich F.S. Reconstructing genome evolution in historic samples of the Irish potato famine pathogen // *Nature Communications*. 2013. V. 4. Article No. 2172. doi: 10.1038/ncomms3172

95. Bianciotto V., Selosse M.A., Martos F., Marmeisse R. Herbaria preserve plant microbiota responses to environmental changes // *Trends Plant Sci*. 2022. V. 27. No. 2. P. 120–123. doi: 10.1016/j.tplants.2021.11.012

96. Pokhilenko V.D., Baranov A.M., Detushev K.V. Methods for long-term storage of collection cultures of microorganisms and development trends // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Meditsinskiye nauki*. 2009. No. 4 (12). P. 99–121 (in Russian).

97. Coleman-Derr D., Desgarennes D., Fonseca-Garcia C., Gross S., Clingenpeel S., Woyke T., North G., Visel A., Martinez-Partida L.P., Tringe S.G. Plant compartment and biogeography affect microbiome composition in cultivated and native *Agave species* // *New Phytologist*. 2015. V. 209. No. 2. P. 798–811. doi: 10.1111/nph.13697

98. Almario J., Jeena G., Wunder J., Langen G., Zuccaro A., Coupland G., Bucher M. Root-associated fungal microbiota of nonmycorrhizal *Arabidopsis thaliana* and its contribution to plant phosphorus nutrition // *Proc. Natl Acad. Sci. USA*. 2017. V. 114. No. 44. P. E9403–E9412. doi: 10.1073/pnas.1710455114

99. Kembel S.W., O'Connor T.K., Arnold H.K., Hubbell S.P., Wright S.J., Green J.L. Relationships between phyllosphere

- bacterial communities and plant functional traits in a neotropical forest // Proc. Natl Acad. Sci. USA. 2014. V. 111. No. 38. P. 13715–13720. doi: 10.1073/pnas.1216057111
100. Wagner M.R., Lundberg D.S., del Rio T.G., Tringe S.G., Dangl J.L., Mitchell-Olds T. Host genotype and age shape the leaf and root microbiomes of a wild perennial plant // Nat. Commun. 2016. V. 7. Article No. 12151. doi: 10.1038/ncomms12151
101. Fitzpatrick C.R., Copeland J., Wang P.W., Guttman D.S., Kotanen P.M., Johnson M.T.J. Assembly and ecological function of the root microbiome across angiosperm plant species // Proc. Natl Acad. Sci. USA. 2018. V. 115. No. 6. P. E1157–E1165. doi: 10.1073/pnas.1717617115
102. Domracheva L.I., Skugoreva S.G., Kovina A.L., Korotkikh A.I., Starikov P.A., Ashikhmina T.Ya. Specificity of plant-microbial complexes under anthropogenic soil pollution (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 3. P. 14–25 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-014-025
103. Domracheva L.I., Kovina A.L., Simakova V.S., Berg A.A. Herbarium samples of brown algae and *Nostoc commune* biofilms as carriers of microflora // Ecology of the native land: problems and ways to solve them: Materialy XIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii c mezhdunarodnym uchastiyem. Book 2. Kirov: Vyatka State University, 2018. P. 27–29 (in Russian).
104. Kovina A.L., Domracheva L.I., Malinina A.I. 120-year preservation of the rhizosphere microflora of herbarium specimens of plants of the family Ranunculaceae (Ranunculaceae) // Biodiagnostics of the state of natural and natural-technogenic systems: Materialy XVI Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii c mezhdunarodnym uchastiyem. Book 1. Kirov: Vyatka State University, 2018. P. 230–233 (in Russian).
105. Domracheva L.I., Kovina A.L., Malinina A.I. Ancient herbariums as a source of “sleeping” microflora // Soil reclamation for sustainable development of agriculture: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 100-letiyu so dnya rozhdeniya professora A.F. Timofeyeva. Part 1. Kirov: Vyatka State Agricultural Academy, 2019, P. 149–156 (in Russian).
106. Kondakova L.V., Domracheva L.I., Ashikhmina T.Ya., Simakova V.S. Biomonitoring capabilities of microorganisms when assessing the degree of toxicity of synthetic surfactants // Theoretical and Applied Ecology. 2018. No. 4. P. 93–98 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-4-093-098
107. Gneusheva I.A., Pavlovskaya N.E., Yakovleva I.V. Biological activity of fungi of the genus *Trichoderma* and their industrial application // Vestnik OrelGAU. 2010. No. 3 (24). P. 36–39 (in Russian).
108. Domracheva L.I., Kovina A.L., Malinina A.I., Lyukina A.L. Antimicrobial activity of the micromycete *Trichoderma* sp., isolated from the rhizospheric soil of the poisonous ranunculus (*Ranunculus sceleratus*) // Ecology of the native land: problems and ways to solve them: Materialy XIV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem. Kirov: Vyatka State University, 2019. P. 217–219 (in Russian).
109. Domracheva L.I., Kovina A.L. Testing the antagonistic activity of micromycetes of ancient herbarium specimens // Microorganisms and soil fertility: Materialy I Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem, posvyashchennoy 90-letiyu so dnya rozhdeniya professora E.M. Pankratovoy. Kirov: Vyatka State Agrrotechnological University, 2022. P. 31–33 (in Russian).
110. Yoshida K., Schuenemann V.J., Cano L.M., Pais M., Mishra B., Sharma R., Lanz C., Martin F.N., Kamoun S., Krause J., Thines M., Weigel D., Burbano H.A. The rise and fall of the *Phytophthora infestans* lineage that triggered the Irish potato famine // eLife. 2013. V. 28. No. 2. Article No. 00731. doi: 10.7554/eLife.00731
111. Li W., Song Q., Brlansky R.H., Hartung J.S. Genetic diversity of citrus bacterial canker pathogens preserved in herbarium specimens // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2007. V. 104. No. 47. P. 18427–18432. doi: 10.1073/pnas.0705590104
112. Eloff J.N. It is possible to use herbarium specimens to screen for antibacterial components in some plants // Journal of Ethnopharmacology. 1999. V. 67. No. 3. P. 355–360. doi: 10.1016/S0378-8741(99)00053-7
113. Vidhya E., Vijayakumar S., Rajalakshmi S., Kalaiselvi S., Pandiyan P. Antimicrobial activity and phytochemical screening of *Ocimum americanum* L. extracts against pathogenic microorganisms // Acta Ecologica Sinica. 2020. V. 40. No. 3. P. 214–220. doi: 10.1016/j.chnaes.2019.09.001
114. Jafari T., Alanne A.L., Issakainen J., Pihlaja K., Sinkkonen J. Suitability of dried herbarium specimens for NMR metabolomics of mushrooms. A comparison of four species of the genera *Kuehneromyces* and *Hypholoma* (Strophariaceae) // Fungal Biol. 2018. V. 122. No. 2–3. P. 138–146. doi: 10.1016/j.funbio.2017.11.007
115. Metcalf J., Beattie K., Purdie E.L., Bryant J.A., Irvine L.M., Codd G.A. Analysis of microcystins and microcystin genes in 60–170-year-old dried herbarium specimens of cyanobacteria // Harmful Algae. 2012. V. 15. No. 6. P. 47–52. doi: 10.1016/j.hal.2011.11.004

Численное моделирование распространения пассивных примесей в Белом море

© 2023. И. А. Чернов¹, к. ф.-м. н., с. н. с.,

А. В. Толстиков², к. г. н., с. н. с., руководитель лаборатории,

¹Институт прикладных математических исследований Карельского НЦ РАН,
180001, Россия, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, д. 11,

²Институт водных проблем Севера Карельского НЦ РАН,
185030, Россия, г. Петрозаводск, пр. А. Невского, д. 50,
e-mail: iachernov@yandex.ru, alexeytolstikov@mail.ru

При отсутствии возможности наблюдений переноса потенциально опасных примесей в акватории моря для расчёта рисков с успехом применяется численное моделирование. В Белом море, транспортном узле и стратегически важном объекте для добычи природных ресурсов, необходимо иметь сценарии развития ситуаций, когда загрязняющие вещества попадают в его воды. Модельный комплекс JASMINE, содержащий блок переноса примесей, способен помочь ответить на ряд вопросов, связанных с распространением загрязнителей и любых пассивных примесей, то есть веществ, не влияющих на плотность воды и динамику вод и льда в Белом море. Выполнены численные эксперименты, показывающие распространение плавучих примесей в акватории Белого моря от дельта-источников, расположенных в устьях крупных рек, а также расчёт сроков освобождения моря от плёнок загрязняющих веществ, изначально равномерно покрывающих всю акваторию. Показано, что сроки выноса поллютантов определяются морфометрическими особенностями залива. Обмен веществом между заливами крайне мал, за исключением переноса Онежский-Двинский-Мезенский, который согласуется с картиной геострофических течений.

Ключевые слова: примеси, адвективный перенос, численное моделирование, Белое море, JASMINE.

Numerical simulation of the passive tracer advection in the White Sea

© 2023. I. A. Chernov¹ ORCID: 0000-0001-7479-9079[†]

A. V. Tolstikov² ORCID: 0000-0002-7690-3404[†]

¹Institute of Applied Mathematical Research of Karelian Research Center of RAS,
11, Pushkinskaya St., Petrozavodsk, Russia, 180001,

²Northern water problems institute of Karelian Research Center of RAS,
50, Nevskogo Avenue, Petrozavodsk, Russia, 185030,
e-mail: iachernov@yandex.ru, alexeytolstikov@mail.ru

It is hardly possible to make experiments on transport of potentially dangerous tracers in a sea. Therefore numerical simulation is successfully used to assess the risks and consequences of various events like oil spills, flux of toxicants with river runoff after industrial accidents or phytoplankton in case of harmful algae bloom. As the White Sea is a transport hub and a strategically important location for extraction of natural resources, so it is important to know the most likely scenarios of pollutants behavior. The JASMINE numerical model, based on the FEMA0 (Finite-Element Model of the Arctic Ocean) simulates evolution of sea state, including three-dimensional currents, temperature and salinity, and sea ice, and is able to calculate tracer advection, so giving answers to a number of questions related to how pollution evolves in the White Sea. We describe numerical experiments to study advection of floating tracers in the White Sea when the initial distribution is delta-like and located in the mouths of main rivers. Also, we calculate the time of almost complete removal of an initially homogeneous concentration of a passive tracer. Spatial resolution is 3 km, vertical grid is 5 m down to the depth level of 150 m (10 m for depths more than 150 m). The time step is 360 s. NOAA/NCEP atmospheric reanalysis is used for atmospheric forcing. Five main rivers are taken into account with the monthly-mean runoff taken from the multi-year observation data. We have estimated the time needed to remove most of the matter from the sea; it depends on morphometric characteristics of the bays and is the highest for the Onezhskiy bay. Matter exchange between the bays is low, only Dvinskiy-Onezhskiy-Mezenskiy transport is present, as we would expect from the geostrophic current pattern.

Keywords: passive tracer, advection, numerical simulation, the White Sea, JASMINE.

Исследование переноса примесей различной природы в море с помощью трёхмерного численного моделирования важно для прогнозирования, например, последствий разливов нефти, утечки радиоактивных веществ из могильников, выяснения путей распространения загрязняющих веществ (ЗВ). Зная источник распространения вещества, его концентрацию, физические свойства (плёнка, трёхмерная примесь и т. д.) и динамику течений водоёма, относительно просто рассчитать пространственно-временную динамику трасера и, в частности, адвекцию трёхмерными течениями. Кроме оценки уронов, нередко возникают задачи расчётов распространения определённых видов живых организмов внутри отдельно взятого водоёма или между водоёмами [1].

Белое море представляет собой удобный полигон для отработки методов численного моделирования, поскольку это относительно небольшой полузамкнутый водоём, к тому же достаточно хорошо исследованный [2].

При моделировании переноса примесей в Белом море остро встаёт вопрос о верификации моделей. Данных по зарегистрированным утечкам нефти или других опасных веществ для этого водоёма объективно недостаточно, но опасность развития таких событий всегда сохраняется. Одними из самых уязвимых районов в этом отношении являются крупные порты Белого моря (рис. 1): Архангельск, Онега, Кандалакша, Беломорск, Кемь, Мезень [3, 4]. Поэтому для разработки алгоритмов действий в чрезвычайных ситуациях при опасности развития экологических катастроф важно иметь сценарии перемещения ЗВ из портов при различных условиях (в зависимости от структуры загрязнителя, его концентрации, сезона, направления ветра и т. д.). Численное моделирование переноса пассивных примесей успешно вписывается в программу современных задач мониторинга водных объектов [5]. Моделированию примесей в водоёмах посвящён ряд работ [6–15], в которых рассматриваются подходы к численному воспроизведению переноса ЗВ. Например, перенос нефтяных пятен [16, 17], ртути [18], радиоактивных веществ [19].

Программный комплекс JASMINE [20–21] позволяет моделировать распространение различных видов примесей, под которыми понимаются любые компоненты органической или неорганической природы, входящие в состав водной среды. Примеси могут быть плавучими, то есть сосредоточенными на поверхности моря и переносимыми горизонтальными течениями

по той же схеме, что и поля, описывающие морской лёд; трёхмерными с нулевой плавучестью (аналогичными, например, солёности); тонущими (обладающими вертикальной скоростью относительно воды – к ним относятся органические останки (детрит); с заданной плотностью (такие примеси могут тонуть в менее плотной воде и всплывать в более плотной). Пассивные примеси (не оказывающие влияния на динамику вод и льда) могут также меняться в силу воздействия различных процессов, а не только перемешиваться течениями: так, биогеохимические поля взаимодействуют в рамках модели экосистемы комплекса JASMINE, компоненты экосистемы морского льда обмениваются веществом с пелагиалью, примеси могут преобразовываться в ходе химических реакций и под воздействием живых организмов.

Моделирование переноса вещества из устьев крупных рек, впадающих в Белое море, проводилось с целью выделения участков акватории, подверженных наибольшему воздействию ЗВ, поступающих с водосбора. Рабочая гипотеза заключалась в том, что время нахождения ЗВ в Белом море будет зависеть от морфометрических особенностей района и устойчивости фронтальных зон, которые, в свою очередь, подвержены внутригодовой изменчивости.

Выполнены модельные расчёты переноса примесей (поверхностных и трёхмерных) в Белом море. Рассмотрены варианты распространения твёрдых примесей, нефти. Результаты экспериментов помогают проследить миграцию веществ в заливах Белого моря и открытых участках акватории.



Рис. 1. Берега и районы Белого моря
Fig. 1. Coasts and parts of the White Sea

Цель работы: с помощью численного моделирования определить сроки и концентрации загрязняющих веществ в Белом море при их поступлении с водосбора с речным стоком.

Объекты и методы исследования

Объектом является поверхностный слой Белого моря, предметом – распространение твёрдых примесей от устьев крупных рек.

Модельный комплекс JASMINE, основанный на конечно-элементной модели Северного Ледовитого океана FEMAO [24, 25], описан в работах [20, 21]. Он позволяет воспроизводить поля течений, температуры и солёности, различных характеристик морского льда. Рабочее разрешение для Белого моря улучшено (по сравнению с упомянутыми работами) до 3 км по горизонтали (море вписано в квадрат 200 на 200 узлов сетки), сетки по вертикали насчитывают 40 горизонтов (используется z-координата и свободная поверхность моря). Шаг по вертикальной оси 5 м, на глубинах более 150 метров шаг составляет 10 м. Условие Флезера на открытой границе обеспечивает сохранение среднего (за достаточно большое время) объёма жидкости. Реки описаны как пресноводные проливы с заданным среднемесячным потоком воды, в них задаётся температура воды и концентрации пассивных примесей. Используются данные по рекам водосбора Белого моря из имеющейся базы [26, 27].

Вычисление переноса скаляров реализовано одношаговым методом Ньютона–Галёркина с коррекцией потоков, обеспечивающим квазимонотонность схемы на приемлемом уровне. К числу скаляров относятся температура и солёность, а также пассивные примеси произвольной природы. Двумерные скалярные поля – это лёд и плавучие примеси произвольной природы.

При переносе примесей необходимо задавать граничные условия на «жидких границах» и в устьях рек. В Белом море одна «жидкая граница» (с Баренцевым морем). Граничное условие для трёхмерного переноса относится к типу Флезера, так что вытекающая вода имеет вычисленную концентрацию примесей, а втекающая – некоторую заданную. Это граничное значение равно нулю, что имеет физический смысл быстрого рассеивания примесей в граничащем с Белым морем Баренцевом море, так что возврат вещества в Белое море отсутствует. Это оправдано, так как баланс водообмена смещён в сторону вы-

текания [6], что подтверждается и в модели: испарение и осадки практически точно компенсируют друг друга, так что годовой водообмен Белого моря практически совпадает с годовым стоком рек.

Однако примеси, изначально сосредоточенные близко к «жидкой границе», исчезают слишком быстро: по-видимому, сроки очищения моря от таких примесей в модели занижены. Если изначально примеси сконцентрированы западнее Горла (рис. 1), влияние границы уже не так значительно.

В реках заданы постоянные концентрации примесей, так что явно описан поток вещества с речным стоком (в частности, нулевой, если в речной воде примеси отсутствуют).

Для плавучих примесей условия задаются иначе. На границе Белого и Баренцева морей условие при втекании воды означает, что концентрация примесей по обе стороны границы одна и та же, то есть при втекании воды концентрации не меняются. Условие проверено для льда и хорошо себя зарекомендовало [7]. Поток плавучих веществ с речным стоком возможен, но, в отличие от трёхмерных примесей, концентрации не уменьшает даже чистая вода: плавучие вещества просто всплывают.

Модельный комплекс JASMINE удовлетворительно воспроизводит динамику и биогеохимические процессы в Белом море, температурные и солёностные поля, фронтальные зоны согласуются с данными измерений [4].

Все модельные данные верифицируются по результатам многолетних исследований Белого моря ИВПС КарНЦ РАН и отражены в работах [5, 8].

Результаты и обсуждение

С помощью численного моделирования на программном комплексе JASMINE был рассмотрен модельный сценарий одновременного поступления ЗВ из устьев рек: Северная Двина, Онега, Мезень, Кемь и Ковда. Моделирование проводили на произвольно взятый период 2015–2017 гг., начиная с 1 января 2015 г., с целью отследить внутригодовую динамику. Исследовали модельные двумерные и трёхмерные примеси, распространяющиеся по поверхности Белого моря без источников и стоков и при нулевых граничных значениях (нет источников на границах).

Различные пассивные примеси изначально были сосредоточены в одном узле сетки (отвечающем устью реки) каждая. Размерность концентрации не влияет на динамику, поэтому

играет роль только относительное её изменение. Начальная концентрация выбрана 100 единиц на 1 м². Под очисткой каждого района моря от примесей подразумеваем снижение концентрации в 20 и более раз (до 5 ед. на 1 м² и менее). Расчёт динамики концентрации этих полей на срок несколько десятков месяцев выявил следующие процессы.

Самый опасный район по накоплению загрязнителей – Онежский залив. Вещество, поступающее сюда либо с водосбора с течением р. Онега, либо проникающее через проливы Соловецкие салмы удерживается здесь длительное время (несколько месяцев). Из Двинского залива ЗВ, наоборот, удаляются достаточно быстро вдоль восточного берега (1–2 месяца). В Кандалакшском заливе водообмен также происходит быстро (1 месяц). В Мезенском заливе этот период аналогично составляет около 1–2 месяцев, однако, учитывая небольшое расстояние от устья р. Мезень до Воронки (около 100 км), вещество покидает этот залив в течение длительного периода времени (по сравнению с другими районами моря).

Параллельно рассчитывалась динамика концентрации, изначально равномерной по

акватории; это соответствует загрязнению всего моря тонкой плёнкой вещества.

Общая последовательность такова: 1) распределение концентрированных примесей по акватории всего моря в поверхностном слое; 2) снижение концентрации в Кандалакшском и Двинском заливах; 3) вещество выносится из моря, но концентрация остаётся заметной в Онежском и Мезенском заливах, у Терского берега. При смене ветра пятно примесей может кратковременно заноситься в Кандалакшский, либо в Двинский залив. В Онежском и Мезенском заливах концентрация выше, чем в соседних районах, вплоть до полного рассеивания вещества. Эксперимент проводили с целью поиска зон длительного удержания поллютантов в акватории Белого моря.

На основании полученных данных была построена схема границ распространения вещества, поступающего с речным стоком (рис. 2).

Показанные границы изменяются в зависимости от сезона года. Так, весной, при наблюдающемся половодье на реках водосбора Белого моря, а также после паводков границы смещаются в мористую часть, при летней и зимней межени – к устьям рек.

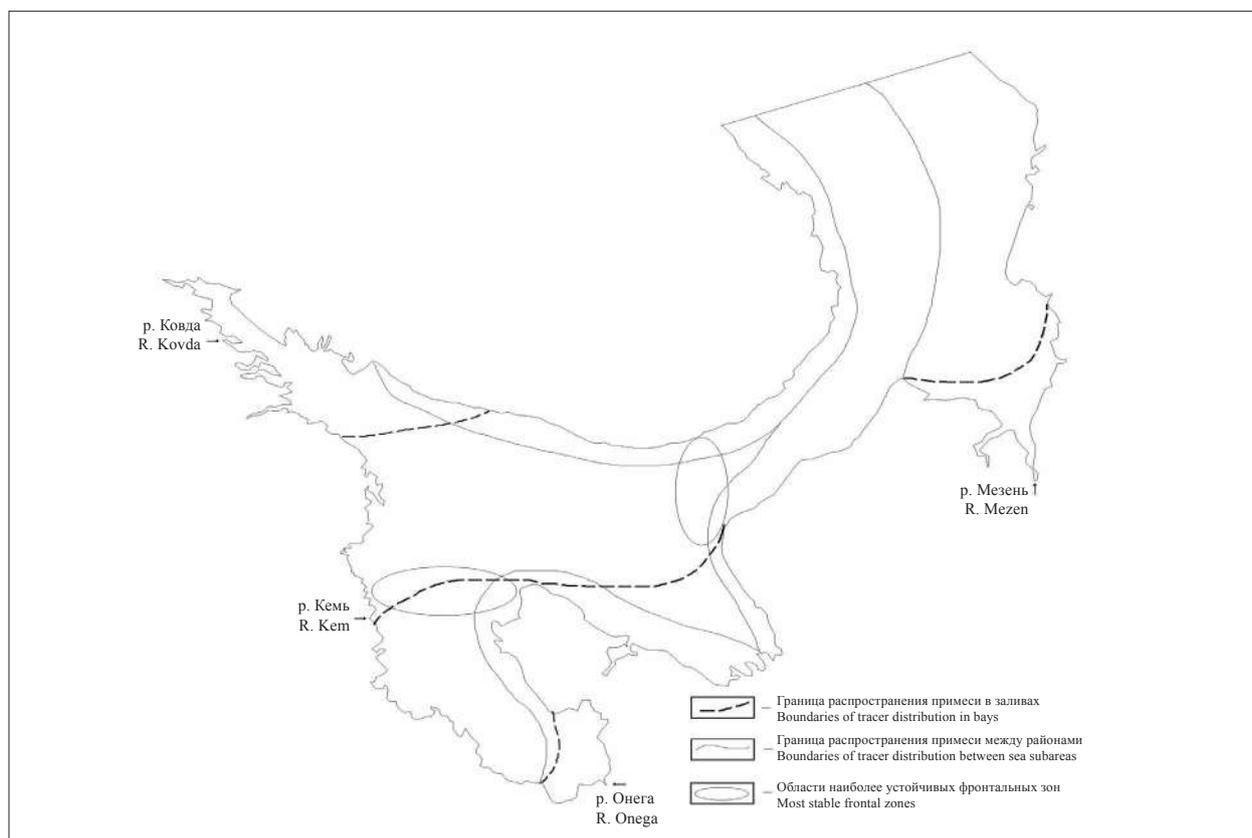


Рис. 2. Границы распространения вещества, поступившего в Белое море с речным стоком рек Северная Двина, Онега, Мезень, Кемь и Ковда
Fig. 2. Boundaries of tracer distribution that entered the White Sea with the river flow of the Northern Dvina, Onega, Mezen, Kem' and Kovda rivers

И. А. Чернов, А. В. Толстик
«Численное моделирование распространения
пассивных примесей в Белом море». С. 21.

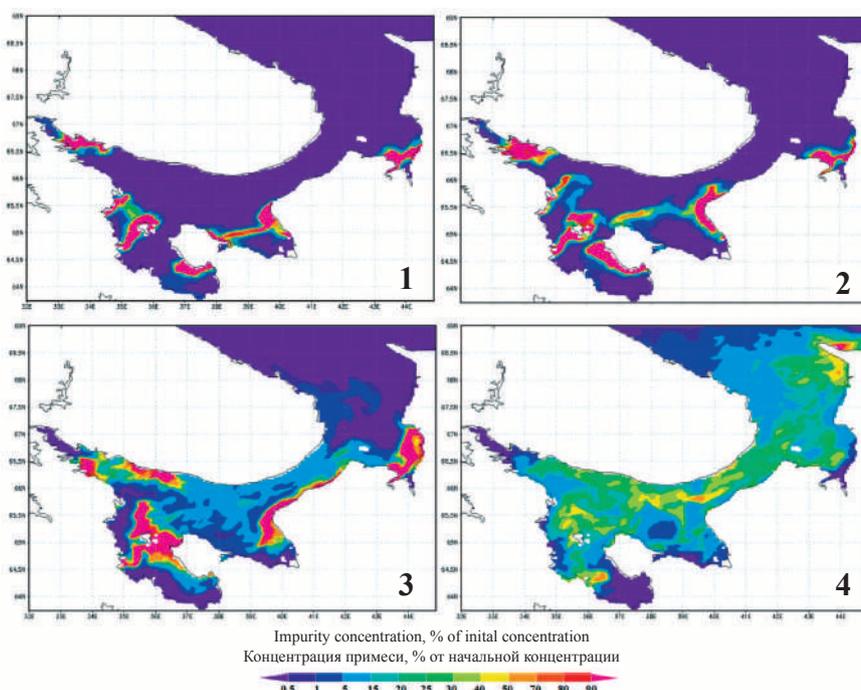


Рис. 3. Распространение примесей из устьев пяти рек (Северная Двина, Онега, Мезень, Кемь, Ковда), в процентах от начальной концентрации. Расчёт: 1) 31 января 2015 г.; 2) 25 февраля 2015 г.; 3) 21 апреля 2015 г.; 4) 20 июля 2015 г.

Fig. 3. Propagation of tracers initially concentrated in mouths of five rivers (Northern Dvina, Onega, Mezen, Kem', Kovda), percent of the initial concentration. Map is for: 1) Jan 31, 2015; 2) Feb 25, 2015; 3) Apr 21, 2015; 4) Jul 20, 2015

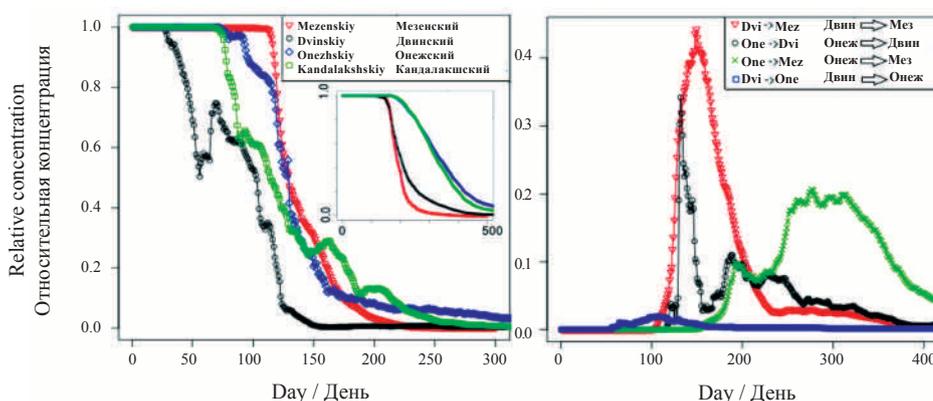


Рис. 4. Слева: поверхностная концентрация плавучих примесей, средняя по акватории залива, в зависимости от времени (сутки), для Мезенского, Двинского, Онежского и Кандалакшского заливов, доля от начальной концентрации. Справа: поверхностная концентрация плавучих примесей, средняя по акватории одного залива относительно начальной концентрации, средней по акватории другого залива; показывает перенос примесей из залива в залив: из Двинского в Мезенский, из Онежского в Двинский и Мезенский, из Двинского в Онежский

Fig. 4. Left: surface concentration of floating tracer, bay-mean, relative to the initial concentration, as a function of time (days) for Mezenskiy, Dvinskiy, Onezhskiy, and Kandalakshskiy bays. Right: surface concentration of floating tracer, bay-mean, relative to initial bay-mean concentration, with initial distribution concentrated in another bay; demonstrates matter exchange between the bays: Dvinskiy-Mezenskiy, Onezhskiy-Dvinskiy, Ontzhskiy-Mezenskiy, and Dvinskiy-Onezhskiy

Полученные данные распространения модельного вещества согласуются с результатами работ [9, 10], в которых выделены районы экологического воздействия на акваторию Белого моря.

Ниже приведены несколько карт для разных дат, показывающие распространение плавучих модельных примесей на поверхности (рис. 3, см. цв. вкладку I).

На рисунке 3 видно, что примеси накапливаются согласно приведённой схеме (рис. 2). Хорошо выделяется фронт в Онежском заливе, границы распространения в Кандалакшском и Двинском заливах, шлейф проникающего вещества из Онежского залива в Двинский и из Двинского залива в Горло, границы в Мезенском заливе. Максимальные концентрации ЗВ прослеживаются у правых берегов заливов или сосредоточены вдоль фронтальных зон, что отражено на рисунке 2.

Актуальной представляется задача определения путей обмена веществом между районами моря. Для этого были рассчитаны сроки и концентрации веществ во всех заливах Белого моря при распространении пассивных плавучих примесей, изначально сосредоточенных в одном узле сетки. Рассчитывалась динамика относительной концентрации. На рисунке 4 (см. цв. вкладку I) слева приведена динамика средней по заливу концентрации как функции времени (в сутках), на врезке показана концентрация, осреднённая по всей акватории моря (этот график позволяет сравнить темпы выноса вещества из моря). Справа показана динамика средней по заливу концентрации примесей, сосредоточенной в другом заливе (относительно начальной средней плотности по его акватории). Она позволяет оценить перенос вещества между заливами. Так, значительная доля вещества, ожидаемо, перетекает из Двинского залива в Мезенский, а из Онежского – в Двинский, и далее в Мезенский. Обратный перенос концентрации этого вещества (из Двинского в Онежский) выражен значительно слабее, а обмен между другими заливами вообще практически отсутствует. Также графики демонстрируют, что вещество в Онежском заливе удерживается дольше всего. Интересно, что эффект гидродинамической ловушки, когда веществу легче попасть в Онежский и Мезенский заливы, чем покинуть их, позволяет загрязнителю удерживаться дольше 100 сут в пределах своего района моря и лишь затем относительно быстро распространиться в направлении против часовой стрелки. Для Кандалакшского залива, где свободному

водообмену с Бассейном ничто не препятствует, подобных процессов не наблюдается. Вещество быстро покидает район загрязнения.

Заключение

Выполнен расчёт переноса примесей различной природы и показаны наиболее опасные районы по накоплению загрязняющих веществ, пути и сроки их перемещения в крупных заливах Белого моря и в целом по всему морю.

Подтвердилась гипотеза о влиянии морфометрических особенностей района моря и фронтальных зон. Так, благодаря этим особенностям вещество удерживается в южной части Онежского и Мезенского заливов; быстро разбавляется и покидает Кандалакшский залив; в Двинском заливе возможен возврат вещества после его выноса течениями.

Наиболее опасный район по накоплению вещества – Онежский залив. Вещество, поступающее с течением р. Онега, либо проникающее через проливы Соловецкие салмы, удерживается здесь недели и месяцы. В Кандалакшском заливе водообмен с Бассейном происходит быстро (1 месяц). Из Двинского залива загрязняющие вещества удаляются достаточно быстро вдоль восточного берега (1–2 месяца). В Мезенском заливе этот период аналогично составляет около 1–2 месяцев, но, учитывая небольшое расстояние от устья р. Мезень до Воронки стоит отметить, что вещество покидает этот залив в течение длительного времени.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-27-20014, проводимого совместно с органами власти Республики Карелия с финансированием из Фонда венчурных инвестиций Республики Карелия (ФВИ РК).

Литература

1. Евсеенко С.А., Мишин А.В. О распределении личинок и локализации нерестовых стад беломорской сельди *Clupea pallasii marisalbi* // Вопросы ихтиологии. 2011. Т. 51. № 6. С. 809–821.
2. Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов / Под ред. Н.Н. Филатова, А.Ю. Тержевика. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 335 с.
3. Кадашова Н.А. Антропогенная нагрузка на водосборе Белого моря // Известия РАН. Серия географическая. 2007. № 2. С. 104–112.

4. Матишов Г.Г., Дженюк С.Л., Булавина А.С. Интегральная оценка потенциального воздействия материкового стока на водную среду Белого моря // Доклады Академии наук. 2018. Т. 481. № 2. С. 203–206.

5. Кутявина Т.И., Ашихмина Т.Я. Современное состояние и проблемы мониторинга поверхностных водных объектов России (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 2. С. 13–21.

6. Кондратьев С.А., Шмакова М.В. Опыт создания математических моделей, описывающих процессы стока и выноса примесей с водосбора // Общество. Среда. Развитие. 2017. № 1 (42). С. 80–84.

7. Камышникова Т.В. Вывод двумерной модели распространения загрязняющих примесей в мелководном водоёме // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск: Актуальные проблемы математического моделирования. 2009. № 8 (97). С. 24–30.

8. Цыденов Б.О. Численное моделирование ветрового воздействия на перенос примеси загрязняющих веществ в Селенгинском мелководье оз. Байкал в период существования осеннего термобара // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2020. № 1. С. 52–56.

9. Зарипов Ш.Х., Марданов Р.Ф., Гильфанов А.К., Шарифудинов В.Ф., Никоненкова Т.В. Математические модели переноса загрязнений в окружающей среде. Казань: Казанский университет, 2018. 47 с.

10. Климок В.И., Дударев А.В. Математическое моделирование динамики пассивной примеси в центральной части озера Селигер // Вестник ТвГУ. Серия: Прикладная математика. 2007. № 1 (4). С. 29–36.

11. Жұрбас В.М., Элькен Ю., Вяли Г., Кузьмина Н.П., Пака В.Т. Пути переноса взвешенных частиц в придонном слое южной Балтики в зависимости от ветровых условий (численные эксперименты) // Океанология. 2010. Т. 50. № 6. С. 890–903.

12. Голенко М.Н., Голенко Н.Н. Исследование распространения пассивной примеси и лагранжевых частиц в прибрежной зоне юго-восточной части Балтийского моря // Вестник БФУ им. И. Канта. Серия: естественные и медицинские науки. 2014. Вып. 1. С. 42–50.

13. Шульга Т.Я., Суслин В.В. Исследование эволюции пассивной примеси в поверхностном слое Азовского моря на основе усвоения данных сканера MODIS-Aqua в гидродинамическую модель // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11. № 3. С. 73–81.

14. Пьянова Э.А. Численное исследование влияния водоёма на перенос примеси от точечного источника // Вычислительные технологии. 2008. Т. 13. Спец. вып. 3. С. 57–63.

15. Сухинов А.И., Никитина А.В., Пескова О.Ю. Математическое моделирование процессов распространения загрязнений и эволюции фитопланктона применительно к акватории Таганрогского залива // Известия ТРТУ. 2001. № 2 (20). С. 32–36.

16. Глухенький И.Ю., Лаврентьев А.В., Попова Г.Г. Моделирование аварийных разливов нефти в Керченском проливе // Безопасность в техносфере. 2011. № 6. С. 3–6.

17. Дембицкий С.И., Лаврентьев А.В., Ларионов А.В., Уртенев М.Х. Динамика нефтяного пятна в море с учётом

процессов деструкции. Математические модели // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2004. № 1. С. 6–10.

18. Макухин В.Л., Потемкин В.Л. Моделирование переноса и трансформации загрязняющих примесей, в том числе ртути, на акватории оз. Байкал // Биосфера. 2012. Т. 4. № 3. С. 286–292.

19. Носов А.В., Крылов А.Л., Арон Д.В., Меркушов В.П. Обзор существующих подходов к моделированию распространения радиоактивных веществ в водных объектах суши в рамках разработки РПК «БАКИС». Препринт № ИБРАЕ-2018-04. М.: ИБРАЭ РАН, 2018. 43 с.

20. Chernov I., Lazzari P., Tolstikov A., Kravchishina M., Iakovlev N. Hydrodynamical and biogeochemical spatiotemporal variability in the White Sea: A modeling study // Journal of Marine Systems. 2018. No. 187. P. 23–35.

21. Chernov I., Tolstikov A., Iakovlev N. Simulating dynamics and ecology of the sea ice of the White Sea by the coupled ice-ocean numerical model // Water. 2022. V. 14. Article No. 2308.

22. Chernov I., Tolstikov A., Baklagin V., Iakovlev N. Winter ice dynamics in a semi-closed ice covered sea: Numerical simulations and satellite data // Fluids. 2022. V. 7. Article No. 324.

23. Чернов И.А., Толстиков А.В., Яковлев Н.Г. Комплексная модель Белого моря: гидротермодинамика вод и морского льда // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. № 8. С. 116–128.

24. Яковлев Н.Г. К вопросу о воспроизведении полей температуры и солёности Северного Ледовитого океана // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 1. С. 100–116.

25. Яковлев Н.Г. Восстановление крупномасштабного состояния вод и морского льда Северного Ледовитого океана в 1948–2002 гг. Часть 2: Состояние ледового и снежного покрова // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 4. С. 1–18.

26. Карпечко В.А., Махальская Н.И., Балаганский А.Ф., Толстиков А.В. Сток рек бассейна Белого моря // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2018621833. Заявление: 2018621418, 08.10.2018. Дата публикации: 19.11.2018. Бюлл. 587.

27. Толстиков А.В., Филатов Н.Н., Здоровеннов Р.Э. Белое море и его водосбор // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2010620435. Заявление: 2010620284, 21.06.2010. Дата публикации: 16.08.2010. Бюлл. 360.

References

1. Evseenko S.A., Mishin A.V. On distribution of larvae and localization of spawning herds of White-sea herring *pallasii marisalbi* // Journal of Ichthyology. 2011. V. 51. No. 6. P. 809–821 (in Russian).

2. The White Sea and its watershed under the influence of climatic and anthropogenic factors / Ed. N.N. Filatov, A.Yu. Terzhevnik. Petrozavodsk: Karel'skiy nauchniy centr RAN, 2007. 335 p. (in Russian).

3. Kadashova N.A. Anthropogenic load in the watershed of the White Sea // *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*. 2007. No. 2. P. 104–112 (in Russian).
4. Matishov G.G., Dzhenyuk S.L., Bulavina A.S. Integrated assessment of the potential impact of the continental runoff on the aquatic environment of the White Sea // *Doklady Akademii nauk*. 2018. V. 481. No. 2. P. 203–206 (in Russian). doi: 10.31857/S086956520001205-8
5. Kut'yavina T.I., Ashihmina T.Ya. Current state and problems of monitoring surface water bodies in Russia (review) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 2. P. 13–21 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-2-013-021
6. Kondrat'ev S.A., Shmakova M.V. Experience of runoff and substances transport modeling in catchment // *Society. Environment. Development*. 2017. No. 1 (42). P. 80–84 (in Russian).
7. Kamyshnikova T.V. Derivation of a two-dimensional model of the distribution of contaminants in a shallow water body // *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki. Thematic issue: Actual problems of mathematical modeling*. 2009. No. 8 (97). P. 24–30 (in Russian).
8. Tsydenov B.O. Numerical simulation of the effect of wind on the transport of contaminants in the Selenga shallow waters of Lake Baikal during the autumnal thermal bar // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 3. Fizika. Astronomiya*. 2020. No. 1. P. 52–56 (in Russian).
9. Zaripov Sh.H., Mardanov R.F., Gil'fanov A.K., Sharafutdinov V.F., Nikonenkova T.V. Mathematical models of pollution transfer in the environment. Kazan': Kazanskiy universitet, 2018. 47 p. (in Russian).
10. Klimok V.I., Dudarev A.V. Mathematical modeling of passive admixture dynamics in the central part of Lake Seliger // *Vestnik TvGU. Seriya: Prikladnaya matematika*. 2007. No. 1 (4). P. 29–36 (in Russian).
11. Zhurbas V.M., El'ken Yu., Vyali G., Kuz'mina N.P., Paka V.T. Ways of transport of suspended particles in the bottom layer of the southern Baltic depending on wind conditions (numerical experiments) // *Okeanology*. 2010. V. 50. No. 6. P. 890–903 (in Russian).
12. Golenko M.N., Golenko N.N. Investigation of the propagation of passive impurities and Lagrangian particles in the coastal zone of the south-eastern part of the Baltic Sea // *Vestnik BFU im. I. Kanta. Seriya: estestvennye i meditsinskie nauki*. 2014. V. 1. P. 42–50 (in Russian).
13. Shul'ga T.Y., Suslin V.V. Investigation of the evolution of the suspended solids in the Sea of Azov based on the assimilation of satellite data in a hydrodynamic model // *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*. 2018. V. 11. No. 3. P. 73–81 (in Russian).
14. P'yanova E.A. Numerical study of the influence of a reservoir on the transfer of impurities from a point source // *Vychislitelnye tekhnologii*. 2008. V. 13. Special issue 3. P. 57–63 (in Russian).
15. Suhinov A.I., Nikitina A.V., Peskova O.Yu. Mathematical modeling of the processes of pollution spreading and phytoplankton evolution in relation to the water area of the Taganrog Bay // *Izvestiya TRTU*. 2001. No. 2 (20). P. 32–36 (in Russian).
16. Gluhen'kiy I.Yu., Lavrent'ev A.V., Popova G.G. Simulation of oil spills in the Kerch Strait // *Bezopasnost' v tekhnosfere*. 2011. No. 6. P. 3–6 (in Russian).
17. Dembitskiy S.I., Lavrent'ev A.B., Larionov A.B., Urtenov M.H. Dynamics of an oil slick in the sea, taking into account the processes of destruction. Mathematical models // *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy Region. Estestvennye nauki*. 2004. No. 1. P. 6–10 (in Russian).
18. Makukhin V.L., Potiomkin V.L. Modeling of the transfer and transformation of pollutants, including mercury, in the lake Baikal basin // *Biosfera*. 2012. V. 4. No. 3. P. 286–292 (in Russian).
19. Nosov A.V., Krylov A.L., Aron D.V., Merkushev V.P. Review of existing approaches to modeling of dispersal of radioactive substances in surface water objects in the framework of development of CPS “BAKIS”. Preprint IBRAE-2018-04. Moskva: NSI RAS, 2018. 43 p. (in Russian).
20. Chernov I., Lazzari P., Tolstikov A., Kravchishina M., Iakovlev N. Hydrodynamical and biogeochemical spatiotemporal variability in the White Sea: A modeling study // *Journal of Marine Systems*. 2018. No. 187. P. 23–35. doi: 10.1016/j.jmarsys.2018.06.006
21. Chernov I., Tolstikov A., Iakovlev N. Simulating dynamics and ecology of the sea ice of the White Sea by the coupled ice-ocean numerical model // *Water*. 2022. V. 14. Article No. 2308. doi: 10.3390/w14152308
22. Chernov I., Tolstikov A., Baklagin V., Iakovlev N. Winter ice dynamics in a semi-closed ice covered sea: Numerical simulations and satellite data // *Fluids*. 2022. V. 7. Article No. 324. doi: 10.3390/fluids7100324
23. Chernov I.A., Tolstikov A.V., Yakovlev N.G. Comprehensive model of the White Sea: hydrothermodynamics of waters and sea ice // *Transactions of Karelian Research Centre of Russian Academy of Science*. 2016. No. 8. P. 116–128 (in Russian).
24. Yakovlev N.G. On the issue of reproducing the temperature and salinity fields of the Arctic Ocean // *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*. 2012. V. 48. No. 1. P. 100–116 (in Russian).
25. Yakovlev N.G. Recovery of the large-scale state of the waters and sea ice of the Arctic Ocean in 1948–2002. Part 2: Condition of ice and snow cover // *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*. 2009. No. 4. P. 1–18 (in Russian).
26. Karpechko V.A., Mahal'skaya N.I., Balaganskiy A.F., Tolstikov A.V. Runoff of the rivers of the White Sea basin // Certificate of state registration of the database No. 2018621833. Application: 2018621418, 08.10.2018. Date of publication: 19.11.2018. Bull. 587 (in Russian).
27. Tolstikov A.V., Filatov N.N., Zdrovenov R.E. The White Sea and its catchment // Certificate of state registration of the database No. 2010620435. Application: 2010620284, 21.06.2010. Date of publication: 16.08.2001. Bull. 360 (in Russian).

Выявление ключевого биотопа бореальных пойменных лугов в национальном парке «Смоленское Поозерье» на основе спутниковых и топографических данных

© 2023. Н. В. Королева¹, к. т. н., н. с.,
Д. В. Ершов¹, к. т. н., зав. лабораторией, в. н. с.,
Е. В. Тихонова¹, к. б. н., в. н. с., Т. Ю. Браславская¹, к. б. н., в. н. с.,
А. О. Харитоновна¹, м. н. с., Е. А. Гаврилюк¹, с. н. с.,
Д. Г. Груммо², к. б. н., директор, А. В. Судник², к. б. н., зав. лабораторией,

¹Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов
Российской академии наук,
117997, Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32,

²Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси,
220072, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Академическая, д. 27,
e-mail: natasha@ifi.rssi.ru

Показана возможность выявления ключевого биотопа бореальных пойменных лугов в национальном парке «Смоленское Поозерье» на основе спектральных и топографических характеристик территории. Ключевой биотоп Е3.47 по EUNIS представляет собой луга вдоль крупных рек с участками со спокойным течением, которые замерзают каждую зиму, заливаются весной. В данную категорию включают участки, открытые или слабо заросшие древесно-кустарниковой растительностью. Для определения участков пойменных лугов использованы мультиспектральные спутниковые изображения Sentinel-2 (ESA Sentinel-2, 2019). Геопространственная оценка бореальных пойменных лугов выполнена с применением метода неуправляемой классификации «K-средних» десяти спектральных каналов спутниковых изображений Sentinel-2, полученных за шесть сезонов, включая период половодья. В результате кластерного анализа выбраны классы, спектрально близкие к луговым сообществам, располагающиеся вдоль пойменных участков рек и не превышающие диапазон перепада высот от уреза воды в 5 м, который соответствует максимально возможному подъёму воды в реках во время паводка для исследуемой территории. Для коррекции выбранных классов был использован топографический индекс, рассчитанный с использованием цифровой модели рельефа (ЦМР) и гидрографической сети местности. Определение точности распознавания класса пойменных лугов производили по матрице ошибок в 133 отрезках вдоль 4 трансект, заложенных в пойменных и суходольных луговых сообществах. Сходимость результатов классификации пойменных лугов с данными наземных обследований составила 75% (каппа Коэна равна 0,53).

Ключевые слова: национальный парк «Смоленское Поозерье», EUNIS, бореальные пойменные луга, Sentinel-2, метод «K-средних», дистанционное зондирование Земли.

Detection of the key biotope of boreal floodplain meadows in the Smolenskoe Poozerye National Park based on satellite and topographic data

© 2023. N. V. Koroleva¹ ORCID: 0000-0002-1620-8231, D. V. Ershov¹ ORCID: 0000-0001-8948-6470,
E. V. Tikhonova¹ ORCID: 0000-0003-4641-3735, T. Yu. Braslavskaya¹ ORCID: 0000-0001-7081-0533,
A. O. Kharitonova¹ ORCID: 0000-0002-0312-942X, E. A. Gavrilyuk¹ ORCID: 0000-0001-7345-2823,
D. G. Grummo² ORCID: 0000-0002-2701-7545, A. V. Sudnik² ORCID: 0000-0002-9682-6901

¹Center for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences,
84/32, Profsovnaya St., Moscow, Russia, 117997,

²V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of NAS of Belarus,
27, Academicheskaya St., Minsk, Belarus, 220072,
e-mail: natasha@ifi.rssi.ru

according to EUNIS is a meadow along large rivers with areas of calm flow; it freeze every winter and affected by flooding in spring. This category includes areas that are open or poorly overgrown with woody and shrubby vegetation. Sentinel-2 multispectral satellite images (ESA Sentinel-2, 2019) are used to determine areas of floodplain meadows. The geospatial assessment of boreal floodplain meadows is carried out using the method of uncontrolled classification of “K-means” of ten spectral channels of Sentinel-2 satellite images obtained over six seasons, including the flood period. As a result of cluster analysis, classes that are spectrally close to meadow communities are selected. These classes located along floodplains of rivers, with the elevation difference from the water line not exceeding 5 m. This elevation corresponds to the maximum possible rise of water in rivers during a flood for the studied area. A topographic index using a digital elevation model (DEM) and a hydrographic terrain network are used to correct the selected classes. The accuracy of recognition of the floodplain meadows class is determined using a matrix of error in 133 segments along the 4 transects located in floodplain and dry meadow communities. The convergence of result between the floodplain meadows classification and ground surveys data was 75% (Cohen’s kappa equals 0.53).

Keywords: Smolenskoe Poozerye National Park, EUNIS, boreal floodplain meadows, Sentinel-2, “K-means” method, Earth remote sensing.

Понятие «местообитание» (англ. *habitat*), или же «биотоп» (англ. *biotope*) определяется как природный или изменённый хозяйственной деятельностью участок территории или акватории, используемый популяциями видов в пределах их природных ареалов и имеющий особые диагностические признаки (географические, абиотические или биотические) по сравнению с другими участками [1]. Научные разработки по классификации биотопов в настоящее время реализованы в системе EUNIS [2, 3].

Понятие «ключевой биотоп» (ключевое местообитание) было введено в рекомендации № 16 Постоянного комитета Конвенции о сохранении европейской дикой природы и естественной среды обитания (Бернская конвенция). К ключевым биотопам были отнесены участки, которые соответствуют одному из критериев (определённых рекомендацией № 16): а) вносят существенный вклад в выживание находящихся под угрозой видов, эндемичных видов или любых видов, перечисленных в приложениях 1 и 2 к Бернской конвенции; б) поддерживают значительное число видов в зоне с высоким видовым разнообразием или важные популяции одного или нескольких видов; в) содержат важные или репрезентативные участки находящегося под угрозой типа биотопов; г) содержат выдающиеся образцы каких-либо особых типов биотопов или группы различных типов биотопов; д) представляют собой территории, важные для одного или большего числа мигрирующих видов; е) иным образом вносят существенный вклад в достижение целей Бернской конвенции [1].

Современный список подлежащих сохранению ключевых биотопов общеевропейского значения определён приложением к резолюции № 4 [4, 5] Постоянного комитета Бернской конвенции. Для исследования был составлен список всех представленных на территории национального парка «Смоленское

Позерье» типов биотопов, классифицированных по EUNIS [6], затем проведена проверка, какие из них рассматриваются в качестве ключевых, их оказалось: 12 лесных, 4 болотных и 1 категория лугов. Ключевой биотоп лугов, представленный в национальном парке – ЕЗ.47 (бореальные пойменные луга). Это луга вдоль крупных рек с участками со спокойным течением, которые замерзают каждую зиму, заливаются весной. Ранее луга использовали как сенокосные угодья, в настоящее время сенокосение практически прекращено. В данную категорию включают участки, открытые или слабо заросшие древесно-кустарниковой растительностью. Биотоп представлен несколькими типами растительности, различающимися в зависимости от водного режима (условий заливания поймы) [7].

Вопросу изучения и картографирования луговых биотопов с помощью аэрокосмических данных различного пространственного разрешения в комбинации с топографической и почвенной информацией модельных территорий посвящено большое число работ [8–12]. В работе [8] использованы разносезонные (апрель, май, июнь и август 2011 г.) спутниковые изображения RapidEye (5 м), данные беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), цифровая модель рельефа (ЦМР) и карты почв для распознавания таких типов биотопов по NATURA2000 как суходольные, заливные (влажные), мезофильные луга, пастбища, пахотные земли и посеы кукурузы модельного участка (Шлезвиг-Гольштейн, Германия). Классификацию проводили методом опорных векторов (Support Vector Machines – SVM) с использованием разных комбинаций спектральных и топографических продуктов модельной территории. В результате точность распознавания естественных луговых сообществ (суходольных, влажных и мезофильных лугов) составила 95,5; 38,1 и 41,7%

соответственно. Увеличение числа признаков за счёт почвенных и топографических данных незначительно улучшило разделимость влажных и мезофильных лугов. Алгоритм SVM хорошо идентифицировал эталонные участки влажных лугов (точность 80,5%), но в значительной степени переоценил его распределение по территории (27,9%). В работе [10] использована гиперспектральная съёмка для пространственной оценки суходольных и пойменных влажных луговых сообществ. Авторы отмечают хорошие перспективные возможности спектральных данных (особенно в ближнем и среднем инфракрасном диапазоне спектра), которые могут потенциально использоваться для мониторинга распространения пойменных луговых сообществ. В исследовании [12] использованы данные разновременной съёмки БПЛА с июня по сентябрь для выделения пойменных лугов реки Ваал в Нидерландах. Классификация 108 признаков методом Random Forest показала очень высокую точность (99,3%) выделения пойменных лугов. При этом авторы отмечают, что наиболее информативными временными периодами съёмки для их модельной терри-

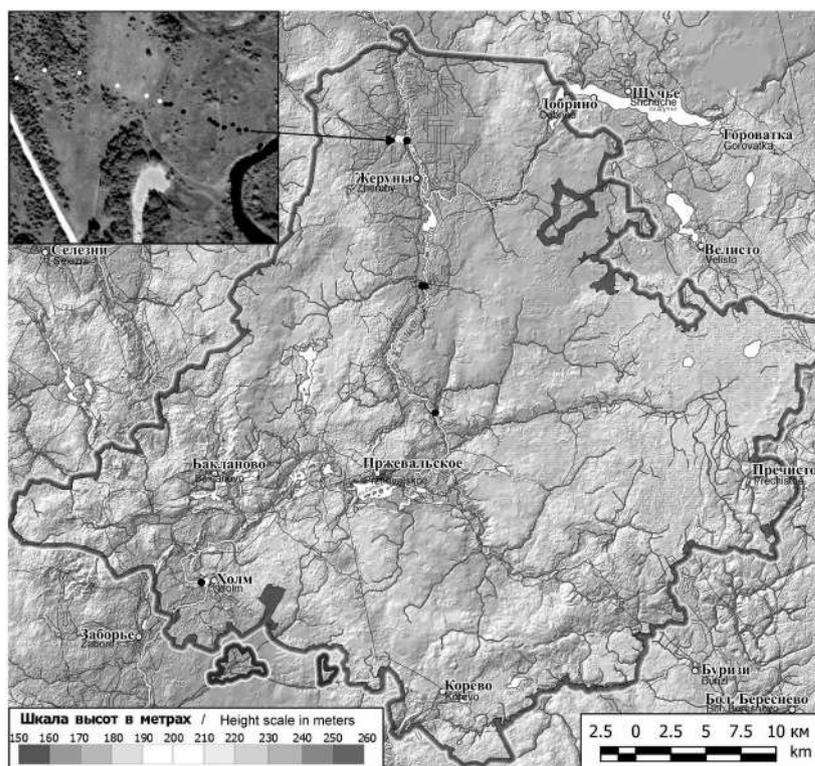
тории является июнь, когда большая часть пойменной растительности достигает максимальной зелени, и сентябрь, когда большая часть пойменной растительности достигает максимальных значений её высоты.

Целью нашего исследования является разработка метода выявления пространственного распространения ключевого биотопа E3.47 по EUNIS – бореальные пойменные луга на примере Национального парка «Смоленское Поозерье» с помощью геопространственного анализа спутниковых данных и топографических характеристик территории.

Объекты и методы исследования

Национальный парк «Смоленское Поозерье» создан 15 апреля 1992 г. на территории Духовщинского и Демидовского районов в северо-западной части Смоленской области [13]. Его общая площадь составляет 146237 га, максимальное расстояние с запада на восток – 55 км, с юга на север – 50 км.

Площадь земель особо охраняемых природных территорий (ООПТ) и объектов – 114444 га, или 78% от общей площади нацио-



Наземные геоботанические площадки / Ground-based geobotanical plots

- E3.47 Заливные луга / Floodplain meadows
- Суходольные луга / Dry meadows

Рис. 1. Расположение площадок (трансект) наземных геоботанических описаний ключевого лугового биотопа
 Fig. 1. Location of vegetation plots (transect) of a key meadow biotope

нального парка [14], из них к лесным землям (включая покрытые лесом) относятся 108327 га (94,6%). Среди нелесных земель преобладают болота и водоёмы (4%). Территория парка относится к бассейну р. Западной Двины. Наиболее крупные реки: Ельша, Гобза, Половья. На территории парка находится более 35 озёр, большинство из которых ледникового происхождения. Самые крупные озёра: Сапшо, Дго, Рытое, Баклановское. Луга в национальном парке занимают незначительную площадь (менее 1% территории) [15].

В 2014–2015 гг. сотрудники Института экспериментальной ботаники им. В.Ф. Купревича (Республика Беларусь) в долинах рек Ельша и Половья в пределах национального парка «Смоленское Поозерье» проводили наземные геоботанические обследования луговых сообществ, на основе которых для четырёх трансект была сформирована база данных геоботанических описаний [16], содержащая следующую информацию: списки видов с указанием их обилия, номера описаний, географических координат, параметров экотопа, уровня грунтовых вод, хозяйственного воздействия, высоты и сомкнутости травостоя. Карта местоположения трансект приведена на рисунке 1.

Для выявления ключевого биотопа пойменных лугов использовали два типа геопространственных данных: мультиспектральные спутниковые изображения Sentinel-2 Европейского космического агентства (ESA) и базовые топографические показатели, рассчитанные с использованием ЦМР и гидрографической сети местности. Из архива ESA за период с 2015 по 2018 гг. мы отобрали шесть безоблачных разносезонных изображений (продукты уровня L1C) за следующие даты: 11 апреля, 11 мая, 26 мая, 24 августа и 18 октября 2018 г., а также 23 сентября 2017 г. Исходные значения спектральных яркостей на уровне верхних слоёв атмосферы в каналах отобранных изображений были пересчитаны в соответствующие значения на уровне земной поверхности с использованием алгоритма MAJA [17]. Цифровая модель рельефа местности была построена на основе горизонталей, оцифрованных по крупномасштабной топографической карте. Прочие элементы географической основы, включая гидрографическую сеть, были сформированы из открытых данных проекта OpenStreetMap (OSM) [18].

Для выявления ключевого биотопа E3.47 были выбраны все спектральные каналы видимого диапазона, «красный край» ближнего

и среднего инфракрасного диапазонов и подготовлен многоканальный стек из безоблачных разносезонных спутниковых изображений Sentinel-2.

Важно отметить, что в стеке присутствует изображение, полученное спутником 11 апреля 2018 г., это максимально близкое изображение к дате весеннего половодья 2018 г. Как следует из «Летописей природы», в 2018 г. весенний подъём воды в реках начался в начале апреля, что на две недели позже, чем в 2017 г. На р. Ельше наблюдался один пик подъёма воды, который пришёлся на 13 апреля (4,6 м от «0» поста), что на 12 дней позже 2017 г. Превышение максимального уровня воды на р. Ельше от прошлогоднего максимума составило 10 см. На р. Половье максимум подъёма пришёлся на 12 апреля и составил всего 1,25 м, что на 65 см меньше значений 2017 г. Во второй половине апреля, как и в прошлые годы, происходило достаточно резкое падение уровня воды в реках. С конца мая на реках установился меженный уровень. Поэтому имеет большое значение наличие снимков определённых дат, ближайших к времени половодья.

Геопространственная оценка ключевого биотопа бореальных пойменных лугов выполнена с применением метода «K-средних» [19, 20] на основе десяти спектральных каналов спутниковых изображений Sentinel-2, полученных за 6 сезонов, включая период половодья (табл. 1).

В результате кластерного анализа выбраны классы, спектрально близкие к луговым сообществам, располагающиеся вдоль пойменных участков рек, и не превышающие диапазон перепада высот от уреза воды в 5 м, который соответствует максимально возможному подъёму воды в реках во время паводка для исследуемой территории.

Для коррекции выбранных классов был использован индекс DTW (Depth-to-Water index – индекс глубины залегания грунтовых вод) и процедура в программе ArcGIS ArcView (CostDistance) для оценки высоты поймы над урезом воды. Выбор индекса основан на опыте предыдущих исследований авторов по изучению возможности выделения типов условий местопрорастания с использованием геопространственных данных [21]. Проанализировав площади классов, отнесённых к луговым сообществам, относительно порядка рек, мы определили размеры буферных зон. Предварительно был выбран только класс рек из открытого источника векторных данных OSM без учёта дренажных каналов и ручьёв. Так

Таблица 1 / Table 1

Перечень спектральных каналов, использованных в исследовании
List of spectral bands used in the analysis

Переменная Variable	Спектральный диапазон Spectral band	Пространственное разрешение, м** Spatial resolution, m**
Спектральные каналы Sentinel-2* / Spectral channels of Sentinel-2*		
BLUE	синий / blue (0,439–0,535 мкм / mkm)	(b2) 10
GREEN	зелёный / green (0,537–0,582 мкм / mkm)	(b3) 10
RED	красный / red (0,646–0,685 мкм / mkm)	(b4) 10
RE1	красный край / red edge (0,694–0,714 мкм / mkm)	(b5) 20
RE2	красный край / red edge (0,731–0,749 мкм / mkm)	(b6) 20
RE3	красный край / red edge (0,768–0,796 мкм / mkm)	(b7) 20
NIR1	ближний инфракрасный / near infrared (0,767–0,908 мкм / mkm)	(b8) 10
NIR2	ближний инфракрасный / near infrared (0,848–0,881 мкм / mkm)	(b8a) 20
SWIR1	средний инфракрасный / shortwave infrared (1,539–1,681 мкм / mkm)	(b11) 20
SWIR2	средний инфракрасный / shortwave infrared (2,072–2,312 мкм / mkm)	(b12) 20

Примечание: * – однотипный набор спектральных каналов использовали для каждого из шести разносезонных изображений, принимавших участие в анализе; ** – обозначение каналов взято с официального сайта Европейского космического агентства.

Note: * – a similar set of spectral channels was used for each of the six different-season images involved in the analysis; ** – channel designation is taken from the European Space Agency website.

как перепады высот и ширина пойм для рек разного порядка могут быть разные, то была применена переменная буферная зона, чтобы ограничить распространение накопленного значения перепада высот. Все реки по величине были разбиты на три порядка и для каждого порядка построена своя буферная зона. Для крупных рек – 900 м, для второго притока – 600 м и для третьего притока – 300 м. Таким образом, пост-обработка позволила убрать участки заливания, не связанные с речными системами.

Результаты и обсуждение

Для оценки информативности спектральных каналов использовали данные наземных геоботанических обследований на четырёх трансектах с характеристикой типа лугового сообщества (заливные/суходольные). Применение процедуры рекурсивного исключения признаков при разделении двух указанных классов позволило провести анализ важности использованных при классификации для выявления пойменных лугов шестидесяти разносезонных спектральных переменных (табл. 1). Так, мы наблюдаем высокую значимость среднего инфракрасного и третьего красного крайнего канала апрельского снимка спутникового изображения Sentinel-2. Напротив, низкая информативность отмечена у значений зелёных (май, сентябрь, октябрь), видимых красных, вторых крайних красных каналов

осенних сцен (сентябрь, октябрь). Среди всех каналов наивысшие относительные показатели имеют третий и второй красные крайние, наименьший – красный видимого спектра. Самым значимым для выявления пойменных лугов сезоном является апрель (11.04.2018), что связано с периодом весеннего половодья, когда выбранный ключевой биотоп маркируется лучше всего (рис. 2). Также значимым для выявления пойменных лугов является снимок, сделанный в вегетационный период (26.05.2018).

В результате применения метода получен продукт, характеризующий пространственное распространение бореальных пойменных лугов вдоль рек (рис. 3, см. цв. вкладку II) с точностью 75%. Вероятность случайной согласованности (каппа Коэна) – $k = 0,53$ (табл. 2).

Можно наблюдать, что при перепаде высот больше 4 м относительно первой точки, выбранной у уреза воды, по данным геоботанических описаний, пойменные луга сменяются на суходольные. По данным спутниковой съёмки определено, что граница между пойменным и суходольным лугом расположена ниже, что может быть связано с тем, что в 2018 г. (год спутниковой съёмки) разлив в реках был меньше среднемноголетней величины, что не позволило выявить пойменный луг с абсолютной точностью. Определение точности распознавания класса пойменных лугов производили по матрице ошибок в 133 отрезках вдоль 4 трансект, заложенных в пойменных и суходольных луговых сообществах.

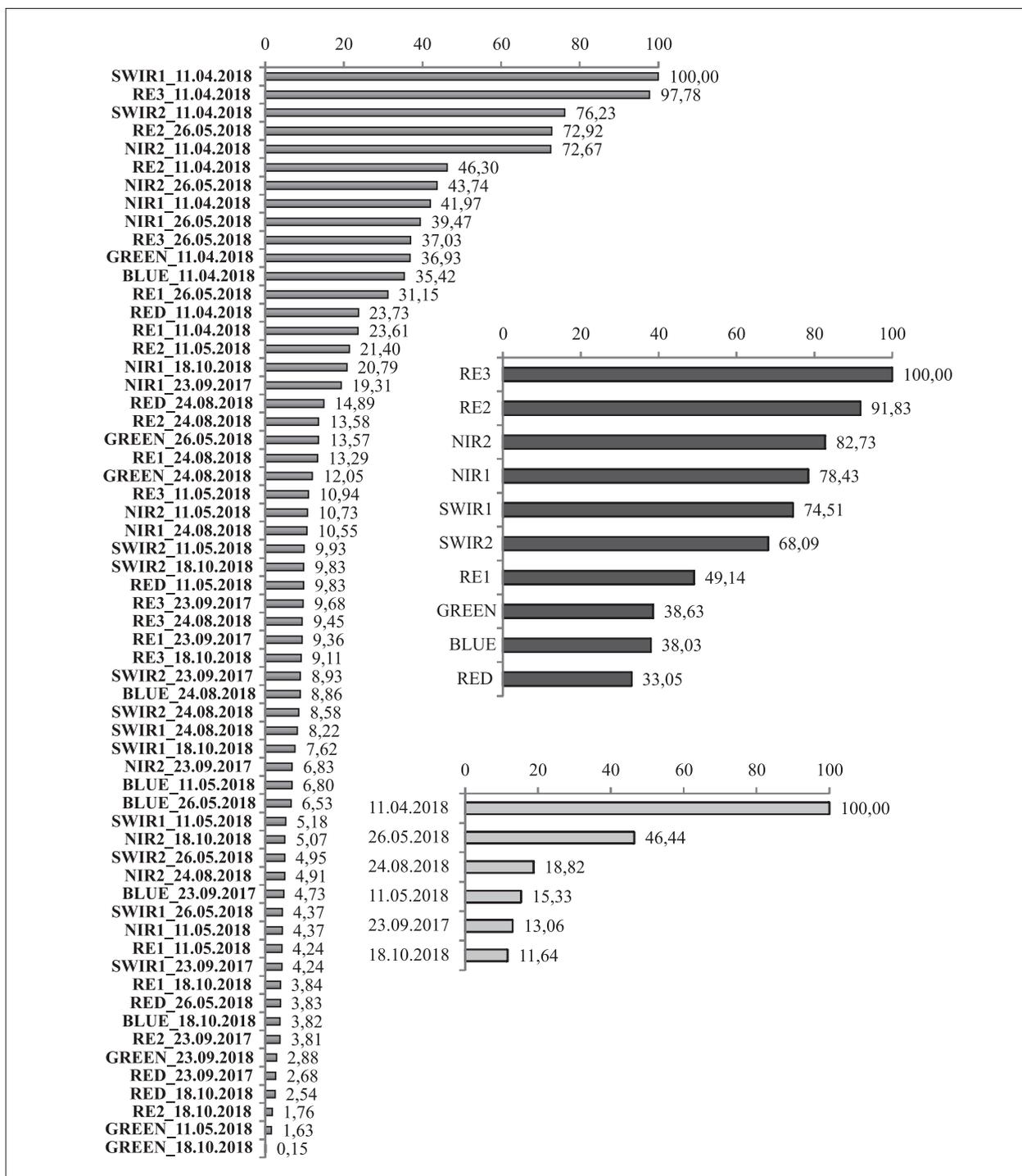


Рис. 2. Относительная информативность переменных при классификации биотопа пойменных лугов по спектральным признакам (слева) и осреднённые показатели информативности по спектральным признакам (справа сверху), по датам съёмки (справа снизу).

Fig. 2. Relative informativeness of variables in the classification of floodplain meadow biotope by spectral features (left) and the averaged indicators of contribution by spectral characteristics (top right), by survey dates (bottom right). Scaling for all graphs was done to the maximum of the values

Матрица ошибок представлена в таблице 2, точность метода составила 75%.

Сравнение результатов пространственной оценки ключевого биотопа по спутниковым данным проводили на основе наземных гео-

ботанических обследований. Пример вертикального профиля трансекты пойменного луга представлен на рисунке 4.

Общая площадь выявленных пойменных лугов в 2018 г. составила 1012,96 га, наиболее

характерно их расположение вдоль рек Ельша, Половья, Василевка, Скрытейка, Сермятка.

Заключение

Выявление и геопространственную оценку бореальных пойменных лугов можно проводить на основе разносезонных спектральных изображений в комбинации с данными релье-

фа местности и информации о гидрологических особенностях исследуемой территории. Отметим, что использование одномоментной съёмки может привести к недооценке площадей пойменных лугов из-за ежегодного варьирования уровня поднятия воды во время половодья. Поэтому более предпочтительно и надёжно использовать временной ряд спутниковых изображений за несколько лет, чтобы

Таблица 2 / Table 2

Матрица ошибок сопоставления результатов выделения биотопа бореальных пойменных лугов с наземными данными / The matrix of errors comparing the results of isolation of boreal floodplain meadows biotope with ground data

Биотопы / Biotopes	ЕЗ.47	Прочие Other	Сумма Total	Отклик Response	F ₁ *
ЕЗ.47 – бореальные пойменные луга / boreal floodplain meadows	56	33	89	62,9	77,2
Прочие (суходольные) луга Other (dry) meadows	0	44	44	100	72,7
Сумма / Total	56	77	133	–	–
Точность / Accuracy	100	57,1	–	75,2	–

Примечание: для ячеек с прочерком расчёт показателей не производится, * – среднее гармоническое между величинами отклика и точности по матрице ошибок.

Note: the calculation of indicators for cells with a dash is not performed, * – harmonic mean between the response and accuracy values according to the error matrix.

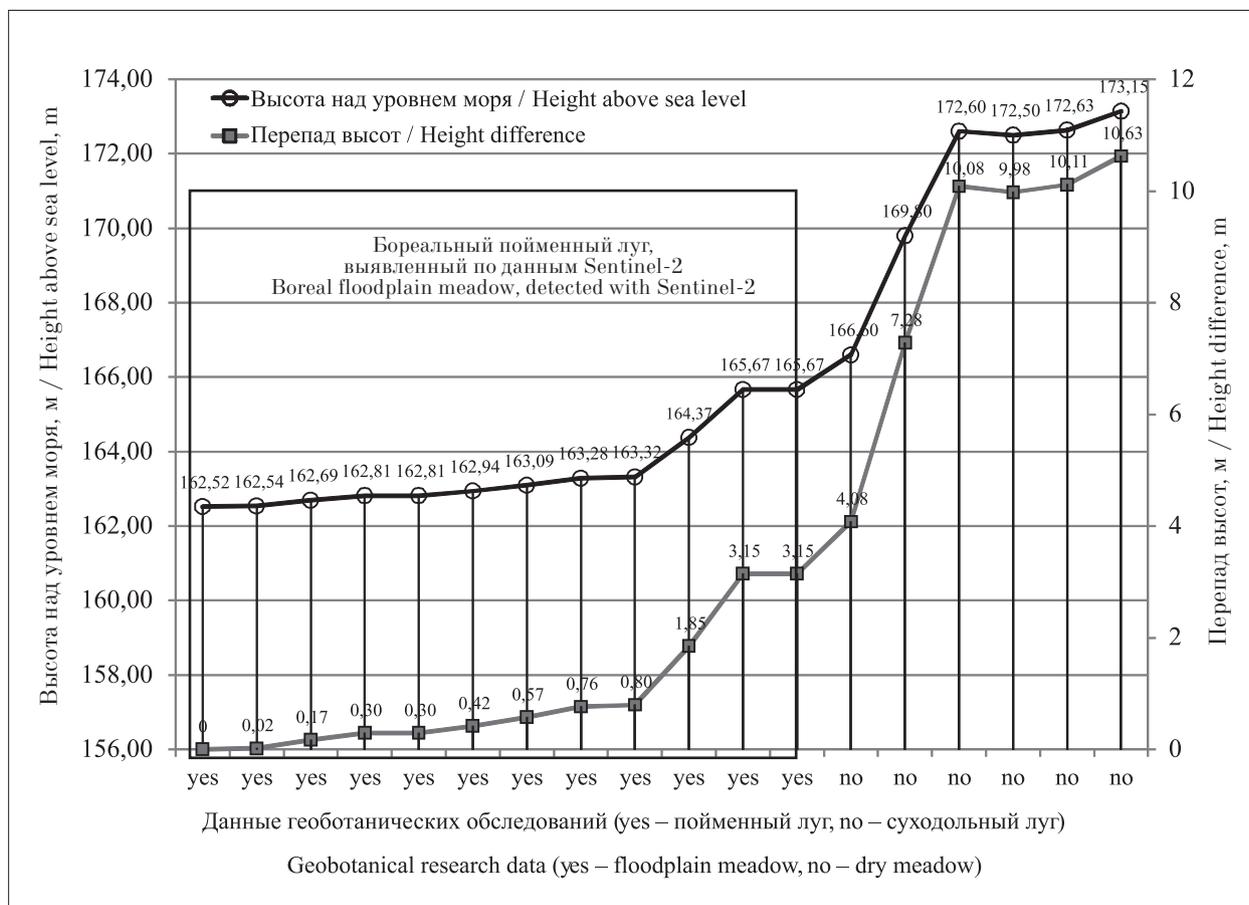


Рис. 4. Вертикальный профиль трансекты, включающей пойменный и суходольный луга
Fig. 4. Vertical profile of the transect, including a boreal floodplain meadow and a dry meadow

**Н. В. Королева, Д. В. Ершов, Е. В. Тихонова, Т. Ю. Браславская,
А. О. Харитонова, Е. А. Гаврилюк, Д. Г. Груммо, А. В. Судник
«Выявление ключевого биотопа бореальных пойменных лугов
в национальном парке «Смоленское Поозерье»
на основе спутниковых и топографических данных». С. 28.**

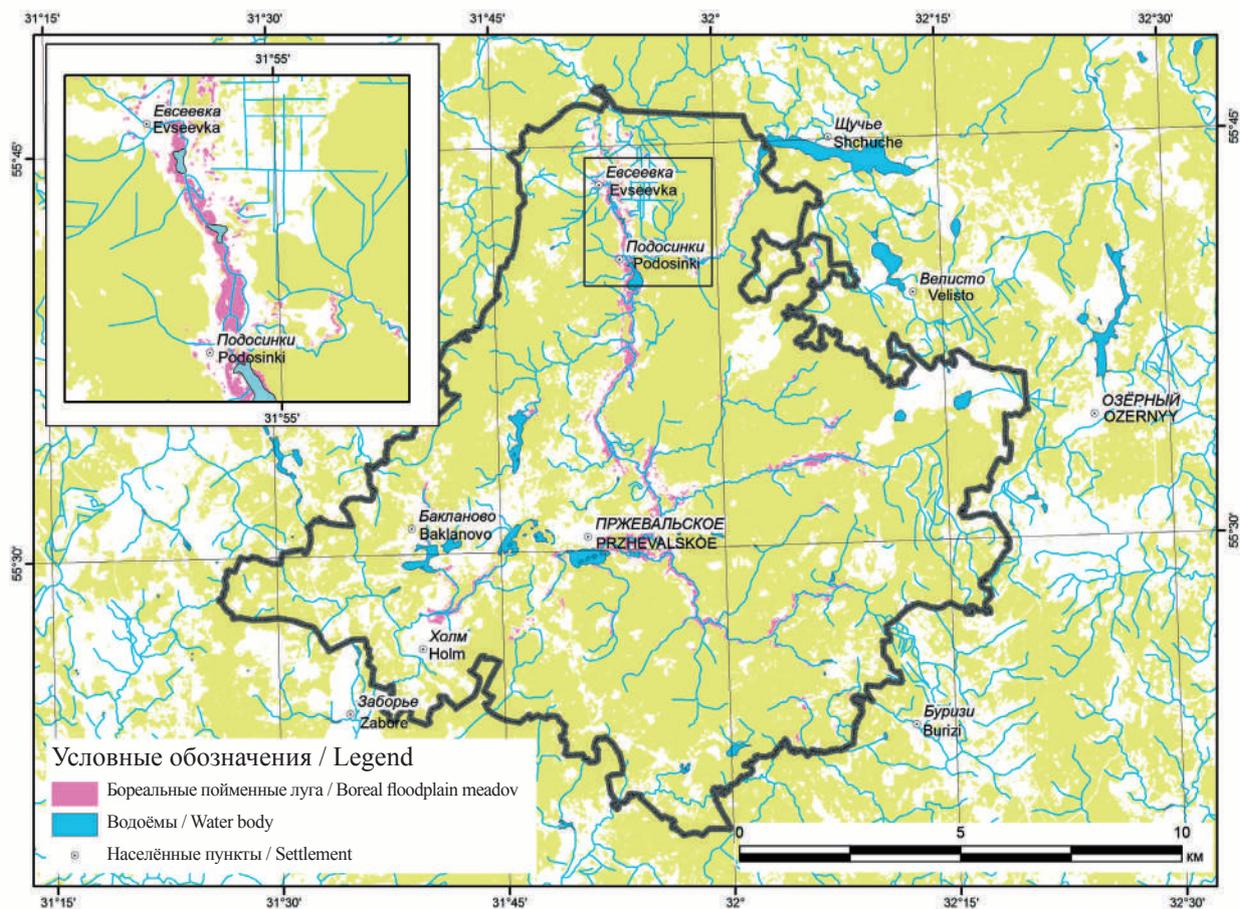


Рис. 3. Карта пространственного распространения ключевого биотопа E3.47 (бореальный пойменный луг) национального парка «Смоленское Поозерье»
Fig. 3. The map of the spatial distribution of the key biotope E3.47 (boreal floodplain meadow) of Smolenskoye Poozerye National Park

восстановить зону максимального заливания в период половодья.

Исследования выполнены в рамках темы Государственного задания «Методические подходы к оценке структурной организации и функционирования лесных экосистем», регистрационный номер НИОКТР 121121600118-8.

Литература

1. Изумрудная сеть территорий особого природоохранного значения. Руководство для органов государственной власти субъектов Российской Федерации, дирекций особо охраняемых природных территорий и органов местного самоуправления / Под ред. Н.А. Соболева, Н.М. Алексеевой, Е.С. Пушай. М., СПб: Издательство Института географии Российской академии наук, 2015. 48 с.
2. Davies C.E., Moss D. EUNIS habitat classification. Final report to the European topic centre on nature conservation from the Institute of terrestrial ecology. Brussels, 1999. 214 p.
3. Schaminée J.H.J., Chytrý M., Hennekens S.M., Mucina L., Rodwell J.S., Tichý L. Development of vegetation syntaxa crosswalks to EUNIS habitat classification and related data sets. Final report to the European Environment Agency EEA/NSV/12/001. Copenhagen, 2012. 134 p.
4. Annex I: natural habitat types of community interest whose conservation requires the designation of special areas of conservation // Council Directive 92/43/EEC of 21 May 1992 on the conservation of natural habitats and of wild fauna and flora – consolidated version 01/01/2007 [Электронный ресурс] <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:1992L0043:20070101:EN:PDF> (Дата обращения: 01.03.2021).
5. Revised Annex I of Resolution 4 (1996) of the Bern Convention on endangered natural habitats types using the EUNIS habitat classification (year of revision 2014). Council of Europe, 2010–2014 [Электронный ресурс] [https://wcd.coe.int/ViewDoc.jsp?Ref=T-PVS/PA\(2010\)10&Language=lanEnglish&Ver=rev&Site=DG4-Nature&BackColorInternet=DBDCF2&BackColorIntranet=FDC864&BackColorLogo=FDC864](https://wcd.coe.int/ViewDoc.jsp?Ref=T-PVS/PA(2010)10&Language=lanEnglish&Ver=rev&Site=DG4-Nature&BackColorInternet=DBDCF2&BackColorIntranet=FDC864&BackColorLogo=FDC864) (Дата обращения: 01.03.2021).
6. Браславская Т.Ю., Тихонова Е.В. Лесные и кустарниковые местообитания национального парка «Смоленское Поозерье»: к вопросу об использовании классификации EUNIS при инвентаризации биоразнообразия и организации его охраны // Разнообразие растительного мира. 2020. № 1 (4). С. 17–35.
7. EUNIS habitat classification – Northern boreal alluvial meadows [Электронный ресурс] <https://eunis.eea.europa.eu/habitats/2497> (Дата обращения: 01.03.2021).
8. Buck O., Garcia Millan V.E., Klink A., Pakzad K. Using information layers for mapping grassland habitat distribution at local to regional scales // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2014. V. 37. No. 7. P. 83–89.
9. Corbane C., Lang S., Pipkins K., Alleaume S., Deshayes M., Garcia Millán V.E., Strasser T., Vanden Borre J.,

Toon S., Förster M. Remote sensing for mapping natural habitats and their conservation status – New opportunities and challenges // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2015. V. 37. P. 7–16.

10. Punalekar S., Verhoef A., Tatarenko I.V., Tol C., Macdonald D.M.J., Marchant B., Gerard F., White K., Gowing D. Characterization of a highly biodiverse floodplain meadow using hyperspectral remote sensing within a plant functional trait framework // Remote Sensing. 2016. V. 8. No. 2. Article No. 112.

11. Lopes M., Fauvel M., Girard S., Sheeren D. Object-based classification of grasslands from high resolution satellite image time series using Gaussian mean map Kernels // Remote Sensing. 2017. V. 9. No. 7. Article No. 688.

12. Iersel W., Straatsma M., Middelkoop H., Addink E. Multitemporal classification of river floodplain vegetation using time series of UAV images // Remote Sensing. 2018. V. 10. No. 7. Article No. 1144.

13. Постановление Правительства Российской Федерации от 15 апреля 1992 г. № 247 «О создании национального парка «Смоленское Поозерье» Министерства экологии и природных ресурсов Российской Федерации в Смоленской области» [Электронный ресурс] <https://base.garant.ru/70252316/> (Дата обращения: 01.03.2021).

14. Лесохозяйственный регламент национального парка «Смоленское Поозерье». М.: Филиал ФГУП «Рослесинфорг» «Заплеспроект», 2015. 190 с.

15. Научные исследования в национальном парке «Смоленское Поозерье». Выпуск 1 / Под ред. С.М. Волкова. М.: НИА-Природа, 2003. 295 с.

16. Судник А.В., Масловский О.М., Вознячук И.П., Дубовик Д.В., Терещенко С.С., Голушко Р.М., Рудакowski И.А. Отчёт о научно-исследовательской работе. Анализ текущего состояния растительности, отдельных популяций охраняемых и инвазивных видов растений на заложенных в 2015 г. пунктах наблюдения мониторинга растительного мира национального парка «Смоленское Поозерье». Минск: Национальная академия наук Беларуси, ГНУ «Институт экспериментальной ботаники им. В.Ф. Купревича НАН Беларуси», 2015. 257 с.

17. Hagolle O., Huc M., Villa Pascual D., Dedieu G. A multi-temporal and multi-spectral method to estimate aerosol optical thickness over land, for the atmospheric correction of FormoSat-2, LandSat, VEN μ S and Sentinel-2 images // Remote Sensing. 2015. V. 7. No. 3. P. 2668–2691.

18. Open street map [Электронный ресурс] <https://www.openstreetmap.org> (Дата обращения: 01.03.2021).

19. Steinhaus H. Sur la division des corps matériels en parties // Bulletin L'Académie Polonaise des Science. 1956. V. 4. No. 12. P. 801–804.

20. Lloyd S.P. Least squares quantization in PCM's // IEEE Transactions on Information Theory. 1982. V. 28. No. 2. P. 129–137.

21. Сочилова Е.Н., Сурков Н.Б., Ершов Д.Б., Егоров Б.А., Барталев С.С., Барталев С.А. Картографирование классов бонитета лесов Приморского края на основе спутниковых изображений и данных о характеристиках

рельефа // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 5. С. 96–109.

References

1. Emerald network of territories of special environmental value. Guidelines for state authorities of the subjects of the Russian Federation, directorates of specially protected natural territories and local self-government bodies / Eds. N.A. Sobolev, N.M. Alekseeva, E.S. Pushai. Moskva, Sankt-Peterburg: Izd-vo Instituta geografii Rossiiskoi akademii nauk, 2015. 48 p. (in Russian).
2. Davies C.E., Moss D. EUNIS Habitat Classification. Final Report to the European topic centre on nature conservation from the Institute of terrestrial ecology. Brussels, 1999. 214 p.
3. Schaminée J.H.J., Chytrý M., Hennekens S.M., Mucina L., Rodwell J.S., Tichý L. Development of vegetation syntaxa crosswalks to EUNIS habitat classification and related data sets. Final report to the European Environment Agency EEA/NSV/12/001. Copenhagen, 2012. 134 p.
4. Annex I: natural habitat types of community interest whose conservation requires the designation of special areas of conservation // Council Directive 92/43/EEC of 21 May 1992 on the conservation of natural habitats and of wild fauna and flora – consolidated version 01/01/2007 [Internet resource] <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:1992L0043:20070101:EN:PDF> (Accessed: 01.03.2021).
5. Revised Annex I of Resolution 4 (1996) of the Bern Convention on endangered natural habitats types using the EUNIS habitat classification (year of revision 2014). Council of Europe, 2010–2014 [Internet resource] [https://wcd.coe.int/ViewDoc.jsp?Ref=T-PVS/PA\(2010\)10&Language=lanEnglish&Ver=rev&Site=DG4-Nature&BackColorInternet=BD2CF2&BackColorIntranet=FDC864&BackColorLogged=FDC864](https://wcd.coe.int/ViewDoc.jsp?Ref=T-PVS/PA(2010)10&Language=lanEnglish&Ver=rev&Site=DG4-Nature&BackColorInternet=BD2CF2&BackColorIntranet=FDC864&BackColorLogged=FDC864) (Accessed: 01.03.2021).
6. Braslavskaya T. Yu., Tikhonova E.V. Forest and shrub habitats within the “Smolenskoe Poozerie” National Park: on the EUNIS habitat classification application for invention and conservation of biodiversity // Diversity of plant world. 2020. No. 1 (4). P. 17–35 (in Russian). doi: 10.22281/2686-9713-2020-1-17-35
7. EUNIS habitat classification – Northern boreal alluvial meadows [Internet resource] <https://eunis.eea.europa.eu/habitats/2497> (Accessed: 01.03.2021)
8. Buck O., Garcia Millan V.E., Klink A., Pakzad K. Using information layers for mapping grassland habitat distribution at local to regional scales // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2014. V. 37. No. 7. P. 83–89. doi: 10.1016/j.jag.2014.10.012
9. Corbane C., Lang S., Pipkins K., Alleaume S., Deshayes M., García Millán V.E., Strasser T., Vanden Borre J., Toon S., Förster M. Remote sensing for mapping natural habitats and their conservation status – New opportunities and challenges // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2015. V. 37. P. 7–16. doi: 10.1016/j.jag.2014.11.005
10. Punalekar S., Verhoef A., Tatarenko I.V., Tol C., Macdonald D.M.J., Marchant B., Gerard F., White K., Gowing D. Characterization of a highly biodiverse floodplain meadow using hyperspectral remote sensing within a plant functional trait framework // Remote Sensing. 2016. V. 8. No. 2. Article No. 112. doi: 10.3390/rs8020112
11. Lopes M., Fauvel M., Girard S., Sheeren D. Object-based classification of grasslands from high resolution satellite image time series using Gaussian mean map Kernels // Remote Sensing. 2017. V. 9. No. 7. Article No. 688. doi: 10.3390/rs9070688
12. Iersel W., Straatsma M., Middelkoop H., Addink E. Multitemporal classification of river floodplain vegetation using time series of UAV images // Remote Sensing. 2018. V. 10. No. 7. Article No. 1144. doi: 10.3390/rs10071144
13. Resolution of the Russian Federation Government of April 15, 1992 No. 247 “On the creation of the national park “Smolenskoe Poozerie” of the Ministry of Ecology and Natural Resources of the Russian Federation in the Smolensk region” [Internet resource] <https://base.garant.ru/70252316/> (Accessed: 01.03.2021) (in Russian).
14. Forestry regulations of the National Park “Smolenskoe Poozerie”. Moskva: Filial FGUP “Roslesinform” “Zaplesproekt”, 2015. 190 p. (in Russian).
15. Scientific research in the National Park “Smolenskoe Poozerie”. V. 1 / Ed. S.M. Volkov. Moskva: NIA-Priroda, 2003. 295 p. (in Russian).
16. Sudnik A.V., Maslovsky O.M., Voznyachuk I.P., Dubovik D.V., Tereshchenko S.S., Galushko R.M., Rudkovsky I.A. A research report. Analysis of the current state of vegetation, individual populations of protected and invasive species of plants on the observation points laid in 2015 vegetation monitoring of the national park “Smolensk Lake”. Minsk: Natsionalnaya akademiya nauk Belarusi, GNU “Institut eksperimentalnoy botaniki im. V.F. Kuprevicha NAN Belarusi”, 2015. 257 p. (in Russian).
17. Hagolle O., Huc M., Villa Pascual D., Dedieu G. A multi-temporal and multi-spectral method to estimate aerosol optical thickness over land, for the atmospheric correction of FormoSat-2, LandSat, VEN μ S and Sentinel-2 images // Remote Sensing. 2015. V. 7. No. 3. P. 2668–2691. doi: 10.3390/rs70302668
18. Open street map [Internet resource] <https://www.openstreetmap.org> (Accessed: 01.03.2021).
19. Steinhaus H. Sur la division des corps matériels en parties // Bulletin L'Académie Polonaise des Science. 1956. V. 4. No. 12. P. 801–804 (in French).
20. Lloyd S.P. Least squares quantization in PCM's // IEEE Transactions on Information Theory. 1982. V. 28. No. 2. P. 129–137.
21. Sochilova E.N., Surkov N.V., Ershov D.V., Egorov V.A., Bartalev S.S., Bartalev S.A. Mapping of forest site index classes in Primorskiy Krai based on satellite images and terrain characteristics // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2018. V. 15. No. 5. P. 96–109 (in Russian). doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-96-109

Применение метода газоразрядной визуализации для оценки скрытых дефектов семян

© 2023. Н. С. Прияткин¹, к. т. н., с. н. с.,

М. В. Архипов^{1,2}, д. б. н., профессор, г. н. с., Л. П. Гусакова¹, к. б. н., в. н. с.,

В. Н. Пищик^{1,3}, к. б. н., с. н. с., Т. А. Кузнецова⁴, к. б. н., доцент,

А. В. Карамышева⁵, вед. специалист, Л. П. Трофимук⁵, агроном,

П. А. Щукина^{1,2}, м. н. с., М. А. Кузнецова⁴, бакалавр,

¹Агрофизический научно-исследовательский институт,

195220, Россия, г. Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 14,

²Северо-Западный центр междисциплинарных проблем

продовольственного обеспечения – обособленное подразделение СПбФИЦ РАН,

196608, Россия, г. Санкт-Петербург-Пушкин, шоссе Подбельского, д. 7,

³Всероссийский научно-исследовательский институт

сельскохозяйственной микробиологии,

196608, Россия, г. Санкт-Петербург-Пушкин, шоссе Подбельского, д. 3,

⁴Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29,

⁵Ботанический институт им. В. Л. Комарова Российской академии наук,

197376, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 2,

e-mail: prini@mail.ru

Метод газоразрядной визуализации (ГРВ, электрофотографии) позволяет регистрировать и количественно оценивать свечение, возникающее вблизи поверхности объекта (семена), при помещении его в электромагнитное поле высокой напряжённости. Методом газоразрядной визуализации в сочетании с автоматическим анализом цифровых газоразрядных изображений выявлены и проанализированы скрытые дефекты изученных семян. Обнаружена невыполненность образцов семян сосны кедровой сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour) и биогенное повреждение бактериального происхождения семян кукурузы сахарной (*Zea mays* L.). Показано, что невыполненные (пустые) семена имеют пониженные значения средней интенсивности цифровых газоразрядных изображений. Согласно полученным данным, методы газоразрядной визуализации и микрофокусной рентгенографии показали высокую эффективность (> 90%) точности при выявлении невыполненных (пустых) семян сосны кедровой сибирской. Проведена сравнительная оценка газоразрядных показателей и всхожести семян как интегральных показателей для оценки биологической полноценности семян кукурузы сахарной. Установлено, что образец семян кукурузы сахарной гибрида Краснодарский 194 МВ характеризовался сниженными значениями средней интенсивности газоразрядных изображений, а также средней яркости цифровых рентгеновских изображений по сравнению с тремя другими образцами семян. Образец гибрида Краснодарский 194 МВ характеризовался худшими посевными качествами: энергией прорастания, всхожестью, длиной корня и длиной ростка. Показано, что семена Краснодарский 194 МВ были поражены фитопатогенными бактериями *Pantoea ananatis*. Обнаружена средняя обратная корреляция ряда характеристик газоразрядного свечения (площадь, суммарная интенсивность) со среднеквадратическим отклонением яркости цифровых рентгеновских изображений, а также слабая достоверная связь большинства газоразрядных характеристик с посевными качествами. Исследованиями подтверждено, что метод газоразрядной визуализации в сочетании с автоматическим анализом цифровых газоразрядных изображений может служить эффективным дополнительным инструментом для оперативного выявления дефектных семян.

Ключевые слова: газоразрядная визуализация (электрофотография) семян, анализ изображений семян, посевные качества семян, *Pinus sibirica* Du Tour, *Zea mays* L.

Application of gas discharge visualization technique for seeds hidden defects evaluation

© 2023. N. S. Priyatkin¹

ORCID: 0000-0002-5974-4288³

M. V. Arkhipov^{1,2}

ORCID: 0000-0002-6903-6971³

L. P. Gusakova¹

ORCID: 0000-0002-6178-2953³

V. N. Pishchik^{1,3}

ORCID: 0000-0001-6422-4837³

T. A. Kuznetsova⁴

ORCID: 0000-0003-0162-0896³

A. V. Karamysheva⁵

ORCID: 0000-0003-1109-5810³

L. P. Trofimuk⁵

ORCID: 0000-0002-1007-5087³

P. A. Shchukina^{1,2}

ORCID: 0000-0002-5223-8374³

M. A. Kuznetsova⁴

ORCID: 0000-0002-0577-2785³

¹Agrophysical Research Institute,
14, Grazhdanskiy Pr., Saint Petersburg, Russia, 195220,

²North-Western Center of Interdisciplinary Researches
of Problems of Food Maintenance,

7, Podbelsky Shosse, Saint Petersburg-Pushkin, Russia, 196608,

³All-Russia Research Institute for Agricultural Microbiology,
3, Podbelsky Shosse, Saint Petersburg-Pushkin, Russia, 196608,

⁴Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
29, Polytechnicheskaya St., Saint Petersburg, Russia, 195251,

⁵Komarov Botanical Institute RAS,
2, Professora Popova St., Saint Petersburg, Russia, 197376,

e-mail: prini@mail.ru

The gas-discharge visualization (GDV, electrophotography) method allows recording and quantifying the glow that occurs near the surface of the object (seed), when placing it in an electromagnetic field of high intensity. The hidden defects – emptiness of *Pinus sibirica* Du Tour seeds and biogenic damage (by phytopathogenic bacteria *Pantoea ananatis*) of *Zea mays* L. seeds were revealed and analyzed by the method of gas discharge visualization in combination with automatic analysis of digital gas-discharge images. It is shown that empty seeds have reduced values of the averaged intensity of digital gas discharge images. According to the data obtained, the methods of gas-discharge imaging (electrophotography) and microfocus radiography showed high efficiency (> 90%) of accuracy in the detection of empty seeds of *Pinus sibirica*. It was found that the sample of *Zea mays* seeds (hybrid Krasnodarskiy 194 MV) was characterized by reduced values of the average intensity of gas-discharge images, as well as the average brightness of digital X-ray images, compared with the other three seed samples. The seed sample of hybrid Krasnodarskiy 194 MB was characterized by the worst sowing qualities: emergence rate, germination, root length and shoot length. It was shown that the Krasnodarskiy 194 MB seeds were affected by phytopathogenic bacteria *Pantoea ananatis*. The average inverse correlations of a number of characteristics of gas-discharge glow (area, total intensity) with the standard deviation of brightness of digital X-ray images, as well as weak reliable correlation of most gas-discharge characteristics with seeding qualities were found. Comparative assessment of gas discharge indices and seedlings germination as integral indices for evaluation of biological completeness of *Zea mays* seeds was carried out. Research has confirmed that the method of gas discharge visualization in combination with automatic analysis of digital gas-discharge images can be used as an effective additional tool for rapid detection of defective seeds.

Keywords: gas discharge visualization (electrophotography) of seeds, seed image analysis, sowing qualities of seeds, *Pinus sibirica* Du Tour, *Zea mays* L.

Известно, что ни один из взятых отдельно методов биотестирования не позволяет сделать достаточно обоснованное заключение о токсичности природных сред. В связи с этим возникает необходимость использования нескольких биологических объектов и методов, т. е. систем тестирования [1].

Для этих целей определённую перспективу имеет метод газоразрядной визуализации, основанный на эффекте Кирилан, разработанный для исследования состояния различных биологических объектов и влияния на них условий окружающей среды. Несмотря на то, что до сих пор интерпретация результатов и механизмы этого явления являются дискуссионными [2, 3], показано, что использование метода газоразрядной визуализации позволяет изучить биологические объекты, спектр которых достаточно широк: от различных жидкофазных объектов (воды, в том числе химически загрязнённые [4–6], натуральные и синтетические эфирные масла [5], различные

биологические жидкости [7, 8]) до сложных биологических систем: растений [9–12], животных [13] и человека [14, 15].

Методика газоразрядной визуализации позволяет следить за динамикой развития микробиологических культур [8], выявлять патологические изменения у растений, возникающие вследствие воздействия патогенов [11] и пестицидов [9]. Вместе с этим сообщается о невозможности выявить некоторые различия при исследовании характеристик газоразрядного свечения у растений, выращенных в различных условиях [10].

Метод позволяет отличать жизнеспособные и нежизнеспособные семена древесных лесных пород, например, бука обыкновенного (*Fagus sylvatica* L.) и клёна обыкновенного (*Acer platanoides* L.) [16], выявлять невыполненность семян, а также структурно-функциональные характеристики семян, обусловленные их сортовой принадлежностью, повреждённостью возбудителями бо-

лезней грибной и бактериальной этиологии, а также сосущими вредителями [17]. С помощью метода электрофотографии возможно также отбирать лучшие семена перед посевом [18]. Имеются данные о связи характеристик газоразрядного свечения семян пшеницы с биологической продуктивностью растений [17].

Задача оценки функционального состояния покоящихся семян, решаемая с помощью метода газоразрядной визуализации, является весьма актуальной для семеноводства, так как ее решение позволит получить новую информацию, существенно сократить время, затрачиваемое на проращивание семян, и получать интегральные характеристики их качества, а возможно и их потенциальной продуктивности. Несмотря на это, количество публикаций по использованию этого метода в семеноводстве пока крайне немногочисленно, исследования в большинстве случаев носят пилотный характер [19].

Цель работы – изучение качества семян древесных лесных пород на примере сосны кедровой сибирской и кукурузы сахарной с использованием методики газоразрядной визуализации (электрофотографии), приёмов автоматического анализа цифровых газоразрядных изображений.

Подбор семян данных видов растений обусловлен возможностью работы с семенами данных видов растений методом газоразрядной визуализации – семена имеют подходящие размеры и толщину.

Объекты и методы исследования

Объектами исследований служили семена сосны кедровой сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour) из Новосибирска и Республики Тыва и кукурузы сахарной (*Zea mays* L.). Семена кукурузы сахарной включали 4 образца: 1 – гибрид РОСС 272 АМВ (происхождение – Волгоградская область), 2 – гибрид РОСС 272 АМВ (происхождение – Саратовская область), 3 – гибрид Краснодарский 194 МВ (происхождение – Алтайский край), 4 – гибрид F1 Лидер 165 (происхождение – Астраханская область). Для исследований характеристик семян кукурузы сахарной инструментальными физическими методами (электрофотография, микрофокусная рентгенография) и оценки их посевных качеств были отобраны средние пробы в количестве 100 штук семян каждого образца. Каждое семя в эксперименте имело индивидуальный номер для сопоставления исследуемых показателей.

Для реализации метода газоразрядной визуализации (электрофотографии) семян специалистами Агрофизического научно-исследовательского института и ООО «Биотехпрогресс» была разработана и апробирована методика газоразрядного свечения семян [19].

Метод газоразрядной визуализации (ГРВ) [20] (электрофотографии) [17] позволяет регистрировать и количественно оценивать свечение, возникающее вблизи поверхности объекта (семена), при помещении его в электромагнитное поле высокой напряжённости. Принцип метода заключается в следующем (рис. 1). Между плоским стеклянным электродом 2, на котором размещается объект исследования 1, и плоским электродом заземления 13, на который устанавливается металлический тест-объект 12, подаются импульсы напряжения длительностью 10 мкс от высоковольтного генератора 5, который генерирует электромагнитное поле. При высокой напряжённости поля в газовой среде пространства контакта объекта 1 и плоского стеклянного электрода 2 развивается лавинный и/или скользящий разряд, параметры которого определяются свойствами объекта. Свечение разряда с помощью оптической системы 6–8 преобразуется в видеосигналы, которые записываются в виде одиночных кадров (ВМР-файлов), каждый из которых представляет собой пространственно распределённую группу участков свечения различной яркости 9 [19].

Аппаратное обеспечение метода представлено серийным прибором «ГРВ Камера». Организация-разработчик и предприятие-производитель ООО «Биотехпрогресс», г. Санкт-Петербург. Программная обработка осуществляется в программе «ГРВ научная лаборатория».

По формулам, приведённым в работах [19, 20], анализируются следующие характеристики цифровых газоразрядных изображений: площадь свечения (пиксели), средняя интенсивность (единицы яркости), коэффициент формы (относительные единицы), средний радиус изолинии (пиксели), нормализованное среднеквадратическое отклонение радиуса изолинии (пиксели), длина изолинии (пиксели), энтропия по изолинии (относительные единицы), фрактальность по изолинии (относительные единицы), суммарная интенсивность (относительные единицы).

Площадь свечения рассчитывается как количество точек изображения с ненулевой интенсивностью, не удалённых при фильтра-

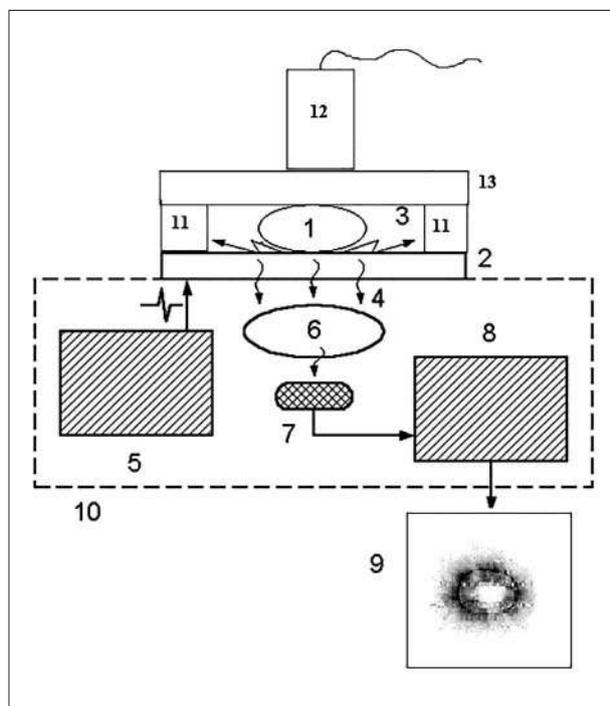


Рис. 1. Принцип метода газоразрядной визуализации (описание см. в тексте)
Fig. 1. Principle of gas discharge technique (see text for description)

ции шума, средняя интенсивность – по всем точкам изображения с ненулевой интенсивностью, не удалённых при фильтрации шума. Параметры рассчитываются по специальным образом формируемой для газоразрядного изображения последовательности чисел, называемой изолинией. Изолиния строится следующим образом.

1. Из центра свечения выпускаются воображаемые лучи к краям картинке. Каждому лучу соответствует своё значение угла, задающего его направление. Этот угол измеряется в градусах и лежит в диапазоне от 0 до 360°. Угол отсчитывается от вертикального направления по часовой стрелке. Лучи с равным шагом по углу покрывают всё изображение. Общее количество лучей определяется как ширина изображения, умноженная на 4. То есть для стандартного размера ГРВ-граммы 320 · 240 количество лучей составит 320 · 4 = 1280.

2. Для каждого луча находится первая (наиболее близкая) от центра точка с интенсивностью, равной средней интенсивности свечения и последняя (наиболее удалённая) от центра точка с такой же интенсивностью.

3. Вычисляется расстояние между двумя найденными точками. Набор полученных расстояний для каждого луча и формирует изолинию.

Таким образом, мы получаем числовую последовательность, характеризующую форму свечения объекта исследования. В тех лучах, которые проходят по ярким стримерам, соответствующее расстояние будет большим. И наоборот, если луч пересекает «провал» в изображении, то и расстояние будет маленьким или нулевым.

Введём ряд обозначений: i – номер луча; N – количество лучей; α_i – угол наклона i -ого луча; D_i – значение изолинии для i -ого луча (расстояние между двумя крайними точками, имеющими значение интенсивности, равное средней интенсивности); x и y – координаты пикселя.

$$\delta_i = D_i \cdot \sin(\alpha_i), y_i = D_i \cdot \cos(\alpha_i)$$

Тогда:

$$L = \sum_{i=1}^N \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} \quad \text{– длина}$$

изолинии,

$$\sum_{i=1}^N D_i$$

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^N D_i}{N} \quad \text{– средний радиус изолинии,}$$

$$K_f = \frac{L}{2\pi \bar{R}} \quad \text{– коэффициент формы,}$$

$$E_{\bar{R}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (D_i - \bar{R})^2}{N - 1}} \quad \text{– среднее квадратическое отклонение (СКО) радиуса изолинии,}$$

$$E_{NR} = \frac{E_{\bar{R}}}{\bar{R}} \quad \text{– нормализованное СКО радиуса изолинии.}$$

диуса изолинии.

Расчёт энтропии выполняли следующим образом.

1. Находим минимальное и максимальное значение изолинии.

2. Делим этот диапазон на заданное количество интервалов. Это количество либо задаётся пользователем явно, либо выбирается таким, чтобы энтропия была максимальной.

3. Пусть k – номер интервала, N_{int} – количество интервалов, N_k – количество значений изолинии, которые попадают в k -тый диапазон. Рассчитываем вероятность попадания значений изолинии в k -тый диапазон по формуле:

$$P_k = \frac{N_k}{N_{\text{int}}}$$

4. Рассчитываем энтропию по Шеннону по формуле:

$$E = - \sum_{i=1}^N P_k \ln(P_k).$$

Фрактальность рассчитывали по изолинии с использованием алгоритма Хигучи (Higuchi).

Параметры численно характеризуют различные аспекты формы свечения. Средний радиус изолинии характеризует ширину свечения вокруг объекта, нормализованное СКО радиуса изолинии характеризует неравномерность ширины свечения по контуру, коэффициент формы и фрактальность – меру изрезанности внешнего контура газоразрядного изображения, энтропия – меру хаотичности изображения.

Суммарная интенсивность рассчитывается по формуле:

$$I_{sum} = \frac{IA}{q},$$

где I – средняя интенсивность, A – площадь, q – константа, равная 100000.

С целью верификации метода газоразрядной визуализации были использованы методы

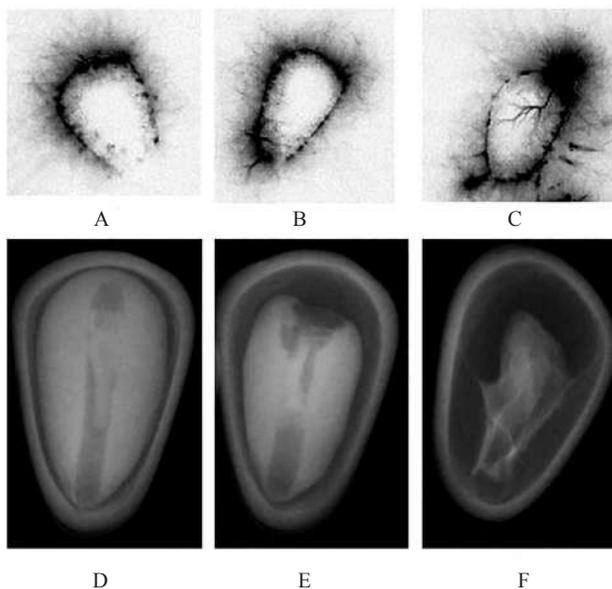


Рис. 2. Примеры цифровых газоразрядных (А–С) и рентгеновских (D–F) изображений: А – газоразрядное изображение нормально сформированного семени, В – недоразвитого семени, С – пустого семени, D – рентгеновское изображение нормально сформированного семени, E – недоразвитого семени, F – пустого семени

Fig. 2. Examples of digital gas discharge (A–C) and X-ray (D–F) images: A – gas discharge image of normally formed seed, B – semi-empty seed, C – empty seed, D – X-ray image of normally formed seed, E – semi-empty seed, F – empty seed

микрофокусной рентгенографии [21] и проращивания семян согласно ГОСТ 12038-84.

Идентификация фитопатогенных бактерий, изолированных с семян кукурузы гибрида Краснодарский 194 МВ, была проведена методом 16S рРНК секвенирования по протоколу [22] с использованием BLAST программы и стандартными биохимическими методами [23, 24]. Был проведён тест на семенах кукурузы по изучению фитопатогенности бактерий [24].

Статистический анализ выполнен с использованием t -критерия в программе MS Excel, а также корреляционного анализа Спирмана в программе Statistica 10.

Результаты и обсуждение

Примеры цифровых газоразрядных изображений и сопряжённого рентгенографического анализа семян сосны кедровой сибирской с дефектами «пустозернистость» и «недовыполненность» представлены на рисунке 2.

Данные, представленные на рисунке 3, показывают, что при пороговом значении средней интенсивности газоразрядных изображений (82 единицы яркости) возможно полностью отделить пустозернистые семена сосны кедровой сибирской, однако в данный диапазон частично попадают и невыполненные, и нормально сформированные семена.

Результаты сравнения эффективности методик газоразрядной визуализации (электрофотографии) и микрофокусной рентгенографии, в сочетании с анализом цифровых рентгеновских изображений и измерений веса индивидуальных семян, по данным анализа семян сосны кедровой сибирской, представлены в таблице 1. Классификация выполнена на основании данных визуального анализа цифровых рентгеновских изображений.

Согласно нашим исследованиям на выбранных образцах, оба метода показали высокую эффективность (> 90%) точности при выявлении невыполненных (пустых) семян сосны кедровой сибирской.

Примеры газоразрядных, рентгеновских изображений семян кукурузы и результаты сопряжённого теста на проращивание представлены на рисунке 4.

Согласно изображениям, представленным на рисунке 4, дефектное семя, характеризующееся более тёмной рентген-проекцией, по сравнению с нормальным семенем, имеет более узкую «корону» неправильной формы.

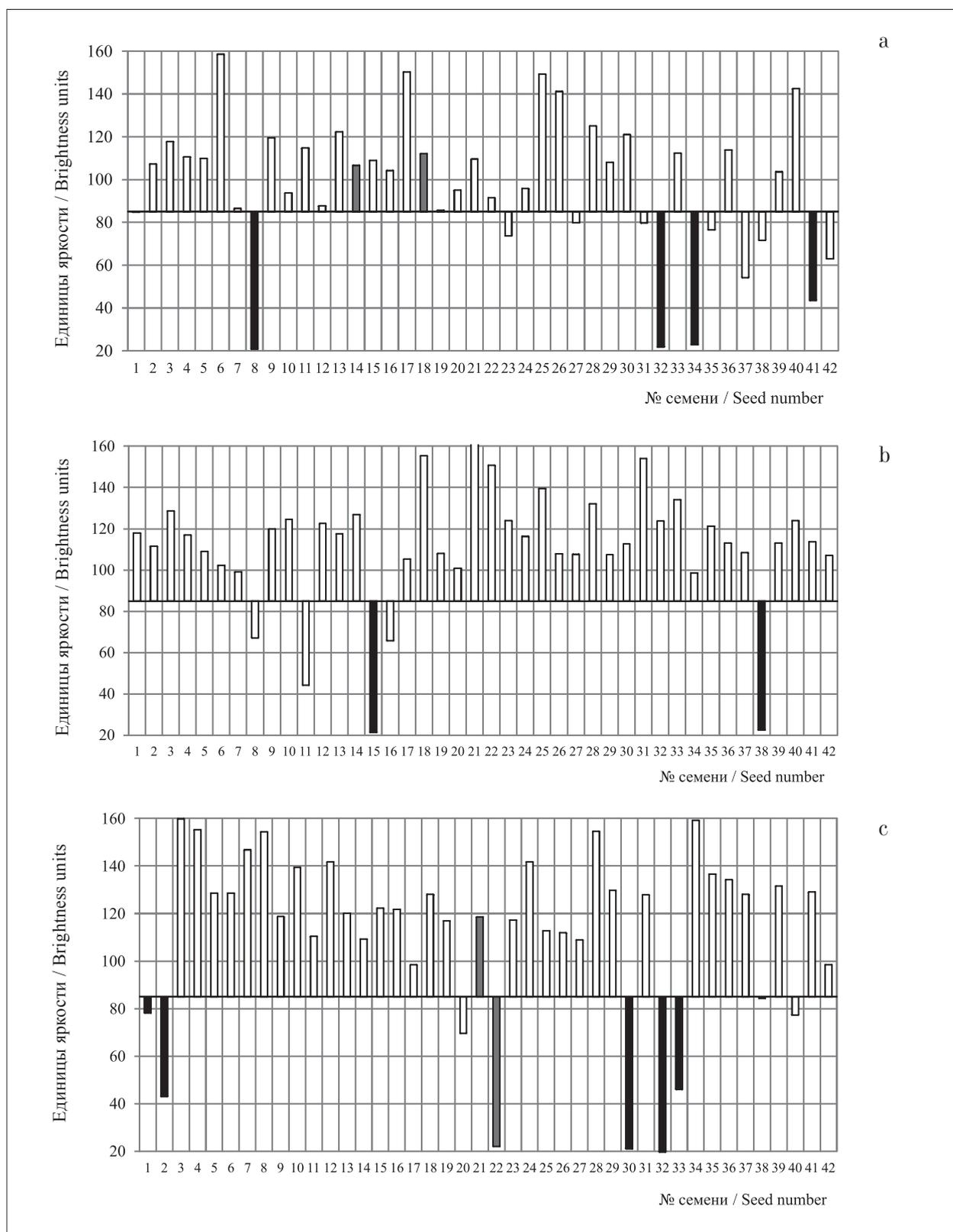


Рис. 3. Средняя интенсивность цифровых газоразрядных изображений семян сосны кедровой сибирской: а – образец № 1 (место сбора семян – Новосибирск); б – образец № 2 (место сбора семян – Новосибирск); с – образец (место сбора семян – Республика Тыва). Столбцы белого цвета (класс А) – нормальные (полнозернистые семена), серого (класс В) – частично пустозернистые, чёрного – пустозернистые (класс С) – невыполненные семена
Fig. 3. Averaged intensity of digital gas discharge images of *Pinus sibirica* seeds: a – sample 1 (place of collection – Novosibirsk); b – sample 2 (place of collection – Novosibirsk); c – sample (place of collection – Tyva Republic). White color chart bars (class A) – normal (full-grain) seeds, gray color chart bars (class B) – partially full-grain seeds, black color chart bars (class C) – empty seeds

Таблица 1 / Table 1

Результаты сравнения эффективности методик газоразрядной визуализации (электрофотографии) и микрофокусной рентгенографии / Results of comparing the effectiveness of gas discharge visualization (electrophotography) and microfocus X-ray techniques

Классы объектов Object categories	Количество объектов Number of subjects	Точность, % / Погрешность, % Accuracy, % / Inaccuracy, %	
		газоразрядная визуализация gas discharge visualization	рентгенография X-ray radiography
Класс А / Category A	110	88 / 12	98 / 2
Класс В / Category B	4	25 / 75	50 / 50
Класс С / Category C	12	100 / 0	92 / 8

Примечание / Note: общее количество объектов – 126 / total number of subjects – 126.

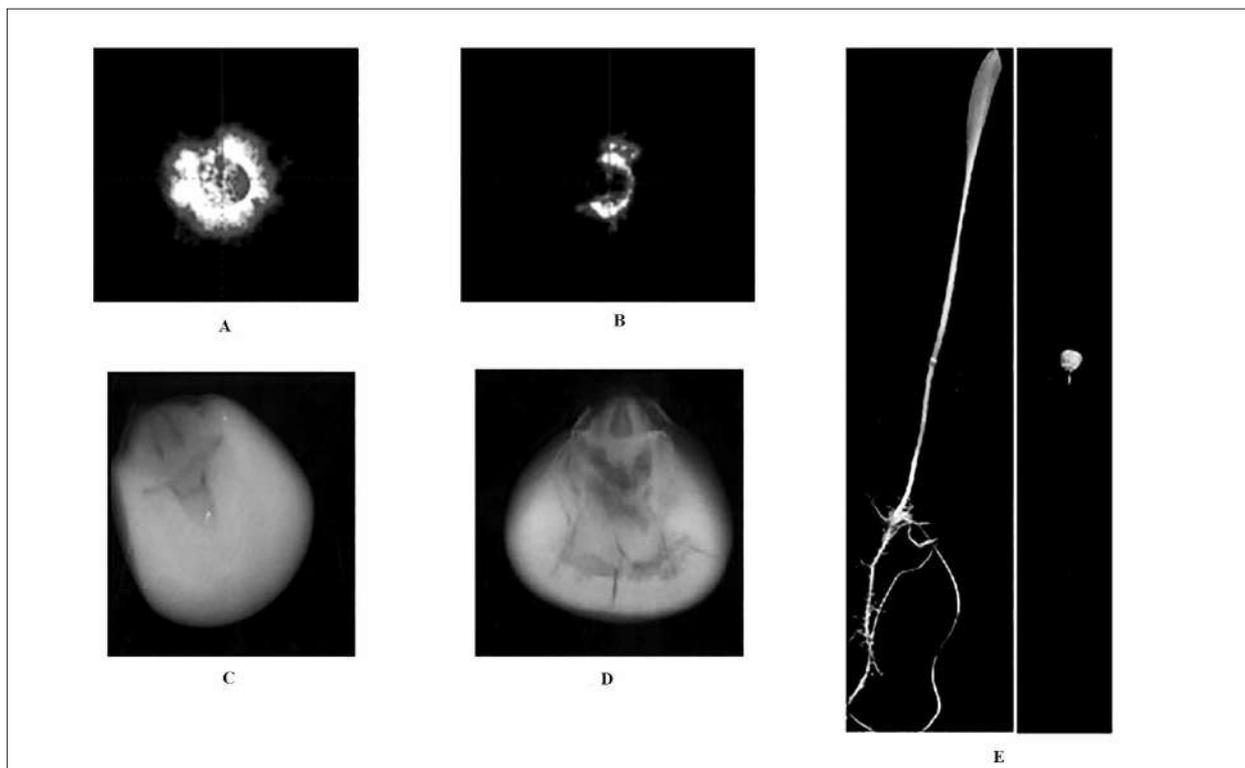


Рис. 4. Примеры газоразрядных, рентгеновских изображений семян кукурузы и результаты сопряжённого теста на проращивание: А – газоразрядное изображение нормального семени; В – газоразрядное изображение семени с дефектом бактериальной этиологии; С – рентгеновское изображение нормального семени; D – рентгеновское изображение семени с дефектом бактериальной этиологии; E – фотография проростка нормального (слева) и дефектного (справа) семени
Fig. 4. Examples of gas discharge and X-ray images of *Zea mays* seeds and results of combined germination test: A – gas discharge image of a normal seed; B – gas discharge image of a seed with a defect of bacterial etiology; C – X-ray image of a normal seed; D – X-ray image of a seed with a defect of bacterial etiology; E – photo of a seedling of normal (left) and defective (right) seeds

Проращивание дефектного семени привело к появлению аномального проростка.

Результаты сравнительного анализа цифровых газоразрядных изображений образцов семян кукурузы представлены в таблице 2.

Обработка данных анализа цифровых газоразрядных изображений кукурузы показала, что гибрид Краснодарский 194 МВ по сравнению с другими образцами семян имеет

статистически значимо пониженные показатели площади, средней интенсивности, суммарной интенсивности, энтропии, фрактальности, длины изолинии и среднего радиуса изолинии цифровых газоразрядных изображений. У образца Краснодарский 194 МВ достоверно выше среднее квадратичное отклонение фрактальности и нормализованное среднее квадратичное отклонение радиуса изолинии.

Таблица 2 / Table 2

Результаты сравнительного анализа характеристик цифровых газоразрядных изображений образцов семян кукурузы / Results of comparative analysis of digital gas discharge images characteristics of *Zea mays* seeds samples

Параметр, единицы измерения Parameters, units	Наименование образца / Sample name			
	РОСС 272 AMB (B) ROSS 272 AMV (V)	Краснодарский 194 MB Krasnodarskiy 194 MV	Лидер 165F1 Lider 165 F1	РОСС 272 AMB (C) ROSS 272 AMV (S)
Площадь, пиксели /Area, pixels	3430±130**	2610±140	3810±130**	3520±150**
Средняя интенсивность, единицы яркости Averaged intensity, brightness units	65,0±2,3**	57,2±2,5	67,2±2,3**	68,5±2,5**
Энтропия, относительные единицы Entropy, relative units	1,77±0,09	1,66±0,09	1,87±0,07**	1,80±0,08*
Фрактальность, относительные единицы Fractality, relative units	1,72±0,01**	1,64±0,02	1,71±0,01**	1,73±0,01**
Суммарная интенсивность, относительные единицы / Summarized intensity, relative units	2,27±0,13**	1,56±0,13	2,61±0,14**	2,47±0,16**

Примечание: * – различия значимы при $p < 0,05$, ** – различия значимы при $p < 0,01$ по сравнению с образцом гибрида Краснодарский 194 MB.

Note: * – differences are significant at $p < 0.05$, ** – differences are significant at $p < 0.01$, in comparison with Krasnodarskiy 194 MV hybrid sample.

Таблица 3 / Table 3

Результаты исследований посевных качеств и влажности семян кукурузы
Results of study of *Zea mays* seeds sowing qualities and moisture content

Показатели Indicators	Наименование образца / Sample name			
	РОСС 272 AMB (B) ROSS 272 AMV (V)	Краснодарский 194 MB Krasnodarskiy 194 MV	Лидер 165F1 Lider 165 F1	РОСС 272 AMB (C) ROSS 272 AMV (S)
Энергия прорастания, % Emergence rate, %	86	16	78	83
Всхожесть, % Germination, %	97	22	89	97
Длина ростка, см Shoot length, cm	10,94±0,35	1,15±0,37	9,14±0,37	10,39±0,37
Длина корня, см Root length, cm	15,8±0,8	2,1±0,7	13,9±0,9	15,0±1,0
Влажность, % Moisture content, %	5,29	5,29	4,91	5,04

Результаты исследований посевных качеств семян кукурузы представлены в таблице 3.

Образец гибрида Краснодарский 194 MB характеризовался худшими посевными качествами: энергия прорастания – 16%, всхожесть – 22%, длина ростка – $1,2 \pm 0,7$ см, длина корня – $2,1 \pm 1,0$ см, по сравнению с тремя другим образцами: РОСС 272 АМВ (Волгоградская обл.) – 86%, 97%, $10,9 \pm 0,8$ см и $15,8 \pm 1,0$ см; РОСС 272 АМВ (Саратовская область) – 83%, 97%, $10,4 \pm 1,0$ см и $15,0 \pm 1,0$ см; Лидер 165 F1 – 78%, 89%, $9,1 \pm 0,9$ см и $13,9 \pm 1,3$ см соответственно. При измерении показателей

энергии прорастания и всхожести отмечалась мацерация семян гибрида Краснодарский 194 MB. При микробиологическом анализе зёрен кукурузы обнаружено поражение зёрен фитопатогенными бактериями. Бактерии были изолированы с семян кукурузы Краснодарский 194 MB и идентифицированы по стандартным биохимическим характеристикам и методу 16 S rRNA как *Pantoea ananatis*. Тест на выявление фитопатогенных свойств бактерий *P. ananatis* на зерне других сортов кукурузы подтвердил способность мацерировать зёрна кукурузы. Поражение листьев и семян кукурузы бактериями

P. ananatis описано ранее другими исследователями [24, 25].

Корреляционный анализ Спирмана выявил закономерности взаимосвязи характеристик газоразрядного свечения семян кукурузы, некоторых рентгеновских характеристик (среднеквадратическое отклонение яркости, средняя яркость) и посевных качеств (энергия прорастания, всхожесть, длина ростка, длина корня).

Была обнаружена средняя обратная корреляция ряда характеристик газоразрядного свечения (площадь, суммарная интенсивность) со среднеквадратическим отклонением яркости цифровых рентгеновских изобра-

жений, а также слабая достоверная связь большинства газоразрядных характеристик с посевными качествами (табл. 4).

Характеристики газоразрядных изображений семян изучались при их различной влажности. Интересно отметить, что влажность семян исследуемых образцов семян кукурузы не имеет прямой взаимосвязи с характеристиками газоразрядных изображений (табл. 3). Значения влажности семян у образца семян кукурузы гибрида Краснодарский 194 МВ достоверно не отличаются от таковых у образца РОСС 272 АМВ (В), при наличии различий их газоразрядных характеристик, веса индивидуальных семян, посевных качеств, а

Таблица 4 / Table 4

Результаты корреляционного анализа данных, полученных для образцов семян кукурузы
Results of correlation data mining obtained for *Zea mays* seed samples

Показатели цифровых газоразрядных изображений, единицы измерения Digital gas discharge images parameters, units	Значения коэффициентов корреляций Спирмана Spearman coefficient correlation values					
	среднеквадратическое отклонение яркости цифровых рентгеновских изображений, единицы яркости standard deviation of brightness of digital X-ray images, brightness unit	средняя яркость цифровых рентгеновских изображений, единицы яркости averaged brightness of digital X-ray images, brightness unit	энергия прорастания, % emergence rate, %	всхожесть, % germination, %	длина корешка, см root length, cm	длина проростка, см shoot length, cm
Площадь, пиксели Area, pixel	-0,50*	0,09	0,27*	0,38*	0,29*	0,30*
Средняя интенсивность, единицы яркости Averaged intensity, brightness unit	-0,42*	-0,10*	0,17*	0,26*	0,17*	0,20*
Энтропия, относительные единицы Entropy, relative unit	-0,16*	0,05	0,10*	0,16*	0,12*	0,12*
Фрактальность, относительные единицы Fractality, relative unit	-0,02	0,27*	0,30*	0,34*	0,30*	0,31*
Суммарная интенсивность, относительные единицы Summarized intensity, relative unit	-0,51*	0	0,25*	0,36*	0,26*	0,28*

Примечание * – корреляции значимы при $p < 0,05$.
Note: * – significant correlation ($p < 0.05$).

также инфекционной нагрузки. Очевидно, что в данном случае различия газоразрядных характеристик связаны не с влажностью семян, а с их электропроводностью, которая оказывает определяющее влияние на инициацию газового разряда при помещении объекта исследований в электромагнитное поле высокой напряжённости, как одним из важнейших показателей, определяющих характеристики газоразрядных изображений биологических объектов [20].

Заключение

Выявлены и проанализированы скрытые дефекты исследуемых образцов семян сосны кедровой сибирской и кукурузы сахарной методом газоразрядной визуализации в сочетании с автоматическим анализом цифровых газоразрядных изображений. Показано, что пустые и частично полнозернистые семена имеют пониженные значения средней интенсивности газоразрядных изображений.

Проведена сравнительная оценка газоразрядных характеристик и всхожести проростков, показана возможность их использования для оценки биологической полноценности семян в качестве интегральных показателей.

Установлено, что метод газоразрядной визуализации (электрофотографии) в сочетании с автоматическим анализом цифровых газоразрядных изображений может служить эффективным дополнительным инструментом для оперативного выявления дефектных семян.

Выражаем благодарность в. н. с. лаборатории микологии ВИЗР, к. б. н. Т.Ю. Гагкаевой за предоставленные образцы семян кукурузы. Видовая идентификация патогенных бактерий была выполнена во ВНИИСХМ в рамках Программы ФАНО России по развитию и инвентаризации биоресурсных коллекций научными организациями.

Литература

1. Чупис В.Н., Журавлёва Л.Л., Иванов Д.Е. Применение в экологических исследованиях методов биотестирования на культурах клеток человека и животных // Теоретическая и прикладная экология. 2008. № 4. С. 71–76.
2. Stanwick M. Aura photography: mundane physics or diagnostic tool? // Nurs Times. 1996. V. 92. No. 25. P. 39–41.
3. Duerden T. An aura of confusion Part 2: the aided eye – “imaging the aura?” // Complement ther Nurs Midwifery. 2004. V. 10. No. 2. P. 116–123.

4. Баркалов А.В., Щевелев М.И., Ащеулов А.Ю. Использование метода ГРВ для анализа химического состава питьевых вод // «Наука. Информация. Сознание. Навстречу олимпийским играм»: VIII Международный конгресс по медицинской и прикладной биоэлектрографии. СПб., 2004. С. 163–165.

5. Korotkov K., Krizhanovsky E., Borisova M., Korotkin D., Hayes M., Matravers P., Komoh K.S., Peterson P., Shiozawa K., Vainshelboim A. Time dynamics of the gas discharge around drops of liquids // J. Appl. Phys. 2004. V. 95. No. 7. P. 3334–3338.

6. Игнатов И.И., Мосин О.В. Эффект Кирлиан в изучении газоразрядного свечения биологических объектов и воды // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 12 (173). С. 37–46.

7. Степанов А.В., Свиридов Л.П., Короткина С.А., Ахметели Г.Г., Крыжановский Э.В. Использование метода ГРВ биоэлектрографии для оценки реакции антиген-антитело // Известия вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49. № 2. С. 32–36.

8. Гудакова Г.З., Галынкин В.А., Коротков К.Г. Исследование характеристик газоразрядного свечения микробиологических культур // Журнал прикладной спектроскопии. 1988. Т. 49. № 3. С. 412–417.

9. Буадзе О.А., Коротков К.Г., Ратман П.А. Изучение влияния гербицида 2,4Д на растительный организм с последующим защитным эффектом витамина В2 методом поверхностной газоразрядной визуализации (эффект Кирлиан) // Сообщения АН ГССР. 1989. Т. 135. № 1. С. 193–196.

10. Sadikov A., Kononenko I. Latest experiments with GDV technique in agronomy // Proceedings of the 6th International Multi-Conference Information Society IS 2003. Collaborative and Information Society, Ljubljana, Solvenia. 2003. P. 110–113.

11. Прияткин Н.С., Дорофеева Т.Б., Коротков К.Г., Слепян Э.И. Газоразрядное свечение древесины стебля однолетнего побега *Ulmus glabra*, инфицированного *Graphium ulmi* // Микология и фитопатология. 2007. Т. 41. № 6. С. 564–567.

12. Ковязин В.Ф., Нгуен Т.Л., Прияткин Н.С. Использование метода газоразрядной визуализации для оценки жизненного состояния деревьев // Естественные и технические науки. 2015. № 6 (84). С. 260–268.

13. Прияткин Н.С., Коротков К.Г., Слепян Э.И., Авдеева Г.С., Дорофеева Т.Б., Пономаренко Г.О. Программно-аппаратный комплекс для установления характеристик газоразрядного свечения «ГРВ-комплекс» и перспективы его использования при анализе состояния организмов и выявлении экологического риска // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного института точной механики и оптики (технического университета). 2003. № 10. С. 151–153.

14. Литвинов О.П., Волкова Т.П. Оценка влияния ионизации воздуха рабочего помещения на психофизиологическое состояние сотрудников с помощью метода

ГРВ биоэлектрографии // Наука. Информация. Сознание: VII Международный научный конгресс по ГРВ биоэлектрографии. СПб., 2003. С. 46–49.

15. Vainshelboim A., Hayes M., Momoh K.S., Raatsi C., Peirce S., Korotkov K., Priyatkin N. GDV technology applications for cosmetic sciences // Proceedings of 18th IEEE Symposium on Computer-Based Medical Systems. Dublin, 2005. P. 437–442.

16. Čater M., Batič F. Determination of seed vitality by high frequency electrophotography // *Phyton: annales rei botanicae*. 1998. V. 38. No. 2. P. 225–336.

17. Martinez M.A., Priyatkin N.S., van Duijn B. Electrophotography in analysis: basic concepts and methodology // *Seed Testing International*. 2018. V. 156. P. 53–56.

18. Zanco J.J. Biofotônica na caracterização de sementes submetidas à altas diluições dinamizadas. Lages, 2016. 238 p.

19. Архипов М.В., Прияткин Н.С., Гусакова Л.П., Борисова М.В., Колесников Л.Е. Методика исследования характеристик газоразрядного свечения семян. СПб.: АФИ, 2016. 52 с.

20. Коротков К.Г. Основы ГРВ биоэлектрографии. СПб.: Изд-во СПб ГУИТМО, 2001. 360 с.

21. Архипов М.В., Прияткин Н.С., Гусакова Л.П., Потрахов Н.Н., Грязнов А.Ю., Бессонов В.Б., Ободовский А.В., Староверов Н.Е. Рентгеновские компьютерные методы исследований структурной целостности семян и их значение в современном семеноведении // *Журнал технической физики*. 2019. Т. 89. № 4. С. 627–638.

22. Karlov D., Sazanova A., Guro P., Kuznetsova I., Verkhozina A., Belimov A., Safronova V. Genetic diversity of rhizobial strains isolated from the relict legumes *Gueldenstaedtia monophylla* and *G. verna* growing in the republics of Altai and Buryatia (Russia) // *Bio. Comm*. 2022. V. 67. No. 3. P. 141–151.

23. Holt J.G., Krieg N.R., Sneath P.H.A., Stanley J.T., William S.T. *Bergey's manual of determinative bacteriology*. Baltimore: Williams and Wilkins, 1994. P. 786–788.

24. Cota L.V., Costa R.V., Silva D.D., Parreira D.F., Lana U.G.P., Casela C.R. First report of pathogenicity of *Pantoea ananatis* in sorghum (*Sorghum bicolor*) in Brazil // *Australasian Plant Disease Notes*. 2010. No. 5. P. 120–122.

25. Mamede M.C., Tebaldi N.D., Mota L.C.B.M., Martins O.M., Coelho L. Detection of *Pantoea ananatis* in corn seeds on semi-selective medium // *Tropical Plant Pathology*. 2018. V. 43. No. 3. P. 254–256.

References

1. Chupis V.N., Zhuravleva L.L., Ivanov D.E. Application of biotesting methods on human beings and animals cell cultures in ecological investigations // *Theoretical and Applied Ecology*. 2008. No. 4. P. 71–76 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2008-4-071-76

2. Stanwick M. Aura photography: mundane physics or diagnostic tool? // *Nurs Times*. 1996. V. 92. No. 25. P. 39–41.

3. Duerden T. An aura of confusion Part 2: the aided eye – “imaging the aura?” // *Complement Ther Nurs Midwifery*. 2004. V. 10. No. 2. P. 116–123. doi: 10.1016/j.ctnm.2004.01.002

4. Barkalov A.V., Shchevelev M.I., Ashsheulov A.Yu. The use of GDV method for the chemical composition of drinking waters analysis // “Science. Information. Spirit. Towards to the Olympic Games”: VIII International Congress of medical and applied Bioelectrography. Sankt-Peterburg, 2004. P. 163–165 (in Russian).

5. Korotkov K., Krizhanovsky E., Borisova M., Korotkin D., Hayes M., Matravers P., Komoh K.S., Peterson P., Shiozawa K., Vainshelboim A. Time dynamics of the gas discharge around drops of liquids // *J. Appl. Phys*. 2004. V. 95. No. 7. P. 3334–3338. doi: 10.1063/1.1651343

6. Ignatov I.I., Mosin O.V. Kirlian effect in studying of gas discharge glow of biological objects and water by the method of color Kirlian analysis // *Nano- and microsystems technology*. 2014. No. 12 (173). P. 37–46 (in Russian).

7. Stepanov A.V., Sviridov L.P., Korotkina S.A., Akhmeteli G.G., Kryzhanovskiy E.V. Using the GDV bioelectrography method to evaluate the antigen-antibody reaction // *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*. 2006. V. 49. No. 2. P. 32–36 (in Russian).

8. Gudakova G.Z., Galynkin V.A., Korotkov K.G. The study of gas discharge luminescence characteristics of microbiological cultures // *Zhurnal prikladnoii spektroskopii*. 1988. V. 49. No. 3. P. 412–417 (in Russian).

9. Buadze O.A., Korotkov K.G., Ratman P.A. Study of the effect of 2.4D herbicide on plant organism with the subsequent protective effect of vitamin B2 by surface gas discharge visualization (Kirlian effect) // *Soobshcheniya AN GSSR*. 1989. V. 135. No. 1. P. 193–196 (in Russian).

10. Sadikov A., Kononenko I. Latest experiments with GDV technique in agronomy // *Proceedings of the 6th International Multi-Conference Information Society IS 2003 C. Ljubljana*, 2003. P. 110–113.

11. Priyatkin N.S., Dorofeeva T.B., Korotkov K.G., Slepian E.I. Gas discharge glow of wood stalk of *Ulmus glabra* annual sprout infected by *Graphium ulmi* // *Mikologiya i fitopatologiya*. 2007. V. 41. No. 6. P. 564–567 (in Russian).

12. Kovyazin V.F., Nguen T.L., Priyatkin N.S. Using gas discharge visualization to assess tree life // *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2015. No. 6 (84). P. 260–268 (in Russian).

13. Priyatkin N.S., Korotkov K.G., Slepian E.I., Avdeeva G.S., Dorofeeva T.B., Ponomarenko G.O. Software and hardware complex for determination of characteristics of gas discharge glow “GDV-complex” and prospects of its use in analysis of state of organisms and identification of ecological risk // *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Sankt-*

Peterburgskogo gosudarstvennogo instituta tochnoy mekhaniki i optiki (tekhnicheskogo universiteta). 2003. No. 10. P. 151–153 (in Russian).

14. Litvinov O.P., Volkova T.P. Assessment of the impact of ionization of the working room air on the psychophysiological state of employees using the GDV Bioelectrography technique // "Science. Information. Spirit": Proc. of VII International Scientific Congress of GDV Bioelectrography. Sankt-Peterburg, 2003. P. 46–49 (in Russian).

15. Vainshelboim A., Hayes M., Momoh K.S., Raatsi C., Peirce S., Korotkov K., Priyatkin N. GDV technology applications for cosmetic sciences // Proceedings of 18th IEEE Symposium on Computer-Based Medical Systems. Dublin, 2005. P. 437–442.

16. Čater M., Batič F. Determination of seed vitality by High Frequency Electrophotography // *Phyton: annales rei botanicae*. 1998. V. 38. No. 2. P. 225–336.

17. Martinez M.A., Priyatkin N.S., van Duijn B. Electrophotography in analysis: basic concepts and methodology // *Seed Testing International*. 2018. V. 156. P. 53–56.

18. Zanco J.J. Biophotonics in seed characterization submitted to high dynamized dilutions. Lages, 2016. 238 p. (in Portugal).

19. Arkhipov M.V., Priyatkin N.S., Gusakova L.P., Borisova M.V., Kolesnikov L.E. Research technique of gas discharge glow characteristics of seed. Sankt-Peterburg: ARI, 2016. 52 p. (in Russian).

20. Korotkov K.G. Basis of GDV bioelectrography. Sankt-Peterburg: SPbGU ITMO, 2001, 360 p. (in Russian).

21. Arkhipov M.V., Priyatkin N.S., Gusakova L.P., Potrakhov N.N., Gryaznov A.Yu., Bessonov V.B., Obodovskiy A.V., Staroverov N.E. X-ray computer methods for studying the structural integrity of seeds and their importance in modern seed science // *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2019. V. 89. No. 4. P. 627–638 (in Russian). doi: 10.21883/JTF.2019.04.47324.170-18

22. Karlov D., Sazanova A., Guro P., Kuznetsova I., Verkhovzina A., Belimov A., Safronova V. Genetic diversity of rhizobial strains isolated from the relict legumes *Gueldenstaedtia monophylla* and *G. verna* growing in the republics of Altai and Buryatia (Russia) // *Bio. Comm*. 2022. V. 67. No. 3. P. 141–151. doi: 10.21638/spbu03.2022.301

23. Holt J.G., Krieg N.R., Sneath P.H.A., Stanley J.T., William S.T. Bergey's manual of determinative bacteriology. Baltimore: Williams and Wilkins, 1994. P. 786–788.

24. Cota L.V., Costa R.V., Silva D.D., Parreira D.F., Lana U.G.P., Casela C.R. First report of pathogenicity of *Pantoea ananatis* in sorghum (*Sorghum bicolor*) in Brazil // *Australasian Plant Disease Notes*. 2010. No. 5. P. 120–122. doi: 10.1007/BF03215904

25. Mamede M.C., Tebaldi N.D., Mota L.C.B.M., Martins O.M., Coelho L. Detection of *Pantoea ananatis* in corn seeds on semi-selective medium // *Tropical Plant Pathology*. 2018. V. 43. No. 3. P. 254–256. doi: 10.1007/s40858-017-0203-z

Динамика экосистем свежего бора центра Приволжской возвышенности

© 2023. А. Ю. Кудрявцев, к. б. н., с. н. с.,
Саратовский филиал Института проблем экологии
и эволюции им. А. Н. Северцова Российской академии наук,
410028, Россия, г. Саратов, ул. Рабочая, д. 24,
e-mail: akydtaks@mail.ru

Приведены результаты исследования динамики довольно редкого для центральной части Приволжской возвышенности типа лесных экосистем – свежего бора (А2). Исследования проводили на территории участка «Верховья Суры» заповедника «Приволжская лесостепь». Ход процесса изучали в возрастном ряду, выделенном в однородных лесорастительных условиях на основе принципов динамической классификации типов леса. В результате обработки данных таксации леса получены средние величины таксационных показателей древостоев для каждого класса возраста. Одновременно проведён анализ изменений всех компонентов насаждений. На его основе возрастной ряд был разделён на отдельные периоды и фазы. Тенденции изменения доли участия каждой лесобразующей породы в составе древостоя на разных возрастных стадиях описаны нелинейными уравнениями. Проведённое исследование показало, что полученный возрастной ряд представляет собой ряд трансформации лесных сообществ. Нарушение хода лесообразовательного процесса привело к масштабной смене коренных насаждений на производные. После начала применения сплошнолесосечных рубок площадь, занятая лиственными деревьями (прежде всего, берёзой), постоянно росла. Следствием масштабного применения рубок промежуточного пользования, санитарных и добровольно-выборочных стало формирование изреженных сосновых древостоев. Одновременно происходила и трансформация нижних ярусов сообществ. Эти факторы вызвали ухудшение условий естественного возобновления сосны (*Pinus sylvestris* L.). В результате к настоящему времени возможность формирования сосновых древостоев путём естественного возобновления почти полностью исключена.

Ключевые слова: лесорастительные условия, динамический ряд, антропогенная трансформация, Приволжская возвышенность.

The dynamic of pine woods ecosystems on the poor sandy soils at the central part of Volga Upland

© 2023. A. Yu. Kudryavtsev ORCID: 0009-0007-7797-4865
Saratov Branch of A. N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution,
Russian Academy of Sciences,
24, Rabochaya St., Saratov, Russia, 410028,
e-mail: akydtaks@mail.ru

The results of a study of the dynamics of a rather rare type of forest ecosystem for the central part of the Volga Upland – fresh pinery (A2) – are presented. The research was carried out on the territory of the Upper Sura section of the Volga Forest-Steppe Nature Reserve. The progress of the process was studied in an age series, identified in homogeneous forest conditions based on the principles of dynamic classification of forest types. As a result of processing forest taxation data, average values of taxation indicators of forest stands were obtained for each age class. At the same time, an analysis of changes in all components of the plantings was carried out. On its basis, the age series was divided into separate periods and phases. Trends in the share of participation of each forest-forming species in the forest stand at different age stages are described by nonlinear equations. The study showed that the resulting age series represents a series of transformation of forest communities. Disruption of the forest formation process led to a large-scale replacement of indigenous plantings with derivatives. After the start of clear-cutting, the area occupied by deciduous trees (primarily birch) constantly grew. A consequence of the large-scale use of intermediate, sanitary and voluntary selective fellings was the formation of thinned pine stands. At the same time, a transformation of the lower tiers of communities also occurred. These factors caused a deterioration in the conditions for natural regeneration of pine (*Pinus sylvestris* L.). As a result, to date, the possibility of forming pine stands through natural regeneration is almost completely excluded.

Keywords: forest-growth conditions, dynamic series, anthropogenous ransformation, Volga Upland.

Проблема изучения динамики лесов, основанная на системных принципах анализа всех компонентов лесных экосистем, – одна из самых актуальных в лесоведении [1–7]. К настоящему времени постоянно усиливающееся антропогенное воздействие привело к радикальному изменению состава и структуры лесов. Коренные лесные сообщества, характеризующиеся высоким биологическим разнообразием и устойчивостью, сменились вторичными лесами упрощённой структуры и низкой устойчивости. Основными факторами, определяющими состояние и развитие лесных экосистем, являются различные виды антропогенного воздействия: рубки, отчуждение территории (сокращение лесной площади и связанная с ним фрагментация лесного покрова), атмосферное загрязнение, лесные пожары, изменение климата [8–16]. Знания, полученные при исследовании динамики лесных сообществ, позволят решить задачу рационального использования лесных ресурсов [17–19].

Важнейшей составной частью программы экологического мониторинга в заповедниках является контроль состояния и естественного развития лесной растительности, не подверженной антропогенному воздействию [20–23]. Один из компонентов такой системы – лесоустройство заповедников [24]. Теоретическую и практическую ценность имеют, прежде всего, долговременные данные о динамике коренных лесов, особенно не затронутых хозяйственной деятельностью, а также оценка роли природных или хозяйственных факторов в этой динамике [25].

Цель данной работы – на основании материалов таксации леса оценить разнообразие и динамику лесных экосистем заповедного участка в пределах отдельного типа лесорастительных условий – свежего бора.

Объекты и методы исследования

Верхнесурский участок заповедника «Приволжская лесостепь», созданный в 1991 г., расположен в центральной части Приволжской возвышенности неподалеку от истоков р. Суры. Площадь участка составляет 6339 га. Средняя высота территории участка около 300 м над уровнем моря. Поверхность сложена породами палеогенового возраста, преимущественно песками и песчаниками. Рельеф слабоволнистый. Встречаются эоловые всхолмления, а также суффозионные воронки и блюдца, которые нередко заняты озёрами или торфяными болотами.

Преобладают коренные сосновые леса, различные по составу, строению и производительности [26]. Леса представлены, в основном, березняками с примесью осины и липы. Многие участки сосновых боров заповедника можно считать уникальными в ценоотическом, флористическом и лесоводственном отношении, поскольку подобные участки высокопродуктивных старовозрастных сосновых лесов встречаются на европейской территории России в настоящее время очень редко. Некоторые древостои имеют возраст 200–250 лет, высоту 34–36 м и диаметр ствола 70–80 см, отдельные деревья достигают 40 м высоты и 100 см в диаметре. В борах сохранился комплекс растений, характерных для таёжной флоры [8, 27, 28].

Первое лесоустройство территории заповедника проведено в 2002–2004 гг. по методу классов возраста по I разряду точности с применением спектрзональных аэрофотоснимков хорошего и удовлетворительного качества масштаба 1 : 10000. Таксация леса проводилась по ходовым линиям (просекам, дорогам, границам, тропам, телефонным линиям, ЛЭП) глазомерным методом в сочетании с элементами измерительно-перечислительной таксации. Для вычисления и корректировки запасов древостоев при таксации использовали стандартные таблицы сумм площадей сечений и запасов древостоев при полноте 1,0, составленные В/О «Леспроект». Текущее и среднее изменение запасов определяли по итоговым данным таблиц классов возраста на компьютере в специальной программе. Инвентаризация лесного фонда была выполнена с повышенной точностью и детализацией. Все насаждения, начиная с молодняков, протаксированы по элементам леса, с указанием для каждого из них возраста, высоты и диаметра. При таксации описаны древостои различного состава и полноты (сомкнутости) в возрасте от 5 до 250 лет. В каждом выделе проводили описание живого напочвенного покрова, при котором учитывали степень проективного покрытия и основные доминанты.

В результате исследований лишено- и бриофлоры, проведённых в 1998 г. сотрудниками Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН М.П. Андреевым и Г.Я. Дорошиной-Украинской на участке было выявлено 60 видов лишайников и 52 вида мхов. Поскольку достаточно точно определять виды мхов и лишайников при таксации было невозможно, в описаниях приводили названия

семейств, наиболее распространённых на территории участка: Cladoniaceae (напочвенные лишайники), Hylocomiaceae (зелёные мхи), Polytrichaceae (долгомошники), Sphagnaceae (сфагновые мхи).

Массовые материалы лесоустройства были обработаны с помощью специально разработанных схем расчёта в программе Microsoft Office Excel 2010.

В 2001–2002 гг. сотрудниками Почвенного института им. Докучаева РАН В.П. Белобровым и А.Я. Ворониным было проведено картирование почвенного покрова участка «Верховья Суры», в результате которого составлена почвенная карта участка масштаба 1 : 10000. При этом были выделены 27 разновидностей почв.

Для типологической оценки лесных земель использован картографический способ, при котором на почвенную карту накладывается план лесонасаждений, и все выделы, попадающие в один почвенный контур, относят к тому или иному типу лесорастительных условий.

В результате обработки полученных данных построен возрастной ряд, состоящий из насаждений свежего бора естественного происхождения [29, 30]. В качестве учётных единиц для изучения динамики использовали описания таксационных выделов, занесённые в базу данных электронных таблиц Excel. В пределах ряда описания группировались по классам возраста. Классы возраста приняты одинаковыми для всех лесообразователей. Продолжительность двух первых классов, соответствующих начальным фазам формирования сообществ, составляет 10 лет, последующих – 20 лет. Оценка хозяйственного воздействия на экосистемы участка выполнена по данным мероприятий, проведённых лесхозом в период с лесоустройства 1982 г. до заповедания участка в 1991 г., то есть примерно за 10 лет. Видовые названия приводятся по [31].

Статистическая обработка материала включала расчёт средних значений для показателей, характеризующих древостой, подрост, подлесок и напочвенный покров. Динамику доли различных пород деревьев в составе древостоев анализировали с помощью аппроксимации нелинейной степенной функцией, качество которой оценивали с помощью коэффициента детерминации (R^2). Статистическую обработку данных выполняли в пакетах программ MS Excel 2010 (Microsoft Corp.) и Statistica 6.0 (Statsoft Inc., OK, USA).

Результаты и обсуждение

Тип леса «свежий бор» образован насаждениями, растущими на почвах бедных минеральными веществами в условиях оптимального увлажнения [32]. В условиях Приволжской возвышенности данный тип леса определяется термином «сосняк травяно-мшистый» или «бор-зеленомошник».

Свежие боры (А2) занимают небольшую площадь. Пять довольно крупных участков приурочены к выровненным поверхностям водоразделов и надпойменных террас на севере и западе. Отдельные мелкие фрагменты встречаются неподалёку от них, растут на дерново-подзолистых слабо дифференцированных песчаных и супесчаных почвах, подстилаемых песками.

Анализ хозяйственных мероприятий, проведённых на территории участка с 1982 по 1991 гг., показал следующее. Площадь рубок всех видов в древостоях свежего бора естественного происхождения составила 48,3 га, в том числе: прочистки – 1,4 га; проходные – 32,5 га; сплошнолесосечные – 14,4 га. Таким образом, в течение 10 лет, предшествующих созданию участка заповедника, различными видами рубок было пройдено около 20% лесов, причём основная нагрузка пришлась на древостой высокого возраста. Кроме того, за этот период на лесосеках было создано 18,5 га лесных культур.

В составе сообществ свежего бора естественного происхождения в целом явно выражено преобладание сосны (*Pinus sylvestris* L.). В то же время довольно значительна доля берёзы (*Betula pendula* Roth). Степень участия осины (*Populus tremula* L.) и широколиственных пород очень мала. Однако видовой состав сообществ с момента их восстановления на обезлесенных участках по мере увеличения возраста формирующихся древостоев существенно изменяется (табл. 1).

При этом изменение доли каждого вида в составе имеет свою специфику. Аппроксимация временного ряда, описывающего динамику доли различных пород деревьев в составе древостоев полиномами второй степени: сосна – $y = -2,0679x^2 + 33,525x - 42,657$ ($R^2 = 0,98$); липа (*Tilia cordata* Mill.) – $y = 2,4833x^2 - 20,85x + 45,067$ ($R^2 = 0,99$); берёза – $y = 0,8179x^2 - 0,9964x + 58,389$ ($R^2 = 0,71$); осина – $y = 2,35x^2 - 22,15x + 53,1$ ($R^2 = 0,99$).

Сосна отсутствует в составе древостоев на начальной стадии (до 10 лет). В возрасте 11–20 лет её присутствие в составе невелико. В даль-

Таблица 1 / Table 1

Характеристика древостоев в возрастном ряду
The timber stands characteristics at the age row

Вид Species	Возраст, лет / Age, year								Среднее Average
	< 10	11–20	21–40	41–60	61–80	81–100	101–120	121–140	
Полнота 1-го яруса / Density of the 1-s canopy									
	0,60	0,75	0,60	0,79	0,70	0,67	0,59	0,80	–
Средняя высота, м / Average height, m									
<i>Pinus sylvestris</i> L.	–	6,0	16,0	19,8	23,0	25,8	25,5	28	–
<i>Tilia cordata</i> Mill.	3,0	6,0	–	14,0	–	–	–	–	–
<i>Betula pendula</i> Roth.	6,0	7,2	23,0	20,8	22,5	23,8	24,1	21	–
<i>Populus tremula</i> L.	4,0	–	–	–	21,4	22,9	–	–	–
Состав, % от общего запаса / Composition, % of common volume									
<i>Pinus sylvestris</i> L.	–	20,0	35,2	54,6	73,1	90,0	91,6	90,5	69,2
<i>Tilia cordata</i> Mill.	26,7	13,3	–	1,4	–	–	–	–	0,8
<i>Betula pendula</i> Roth.	40,0	66,7	64,8	44,0	25,8	5,2	8,4	9,5	27,8
<i>Populus tremula</i> L.	33,3	–	–	–	1,1	4,8	–	–	2,2

Примечание: прочерк – вид отсутствует.
Note: dash – species is absent.

Таблица 2 / Table 2

Доля древостоев различного типа в возрастном ряду (% от общей площади)
Share of the different types of timber stands at the age row, % of the common square of timber stands

Тип сообществ Community types	Возраст, лет / Age, year								Среднее Average
	< 10	11–20	21–40	41–60	61–80	81–100	101–120	121–140	
Сосняки чистые Pure pine	–	–	–	–	30,8	50,0	100,0	100,0	34,4
Сосняки смешанные Mixed pine	–	–	10,7	42,2	23,8	48,1	–	–	26,3
Сосново-мелколиственные Pine small-leafs	–	–	28,3	23,1	34,0	1,9	–	–	25,0
Широколиственные смешанные Mixed broad-leafs	–	5,6	–	–	–	–	–	–	0,1
Берёзовые чистые Pure birch	–	–	31,8	5,8	11,0	–	–	–	7,9
Берёзовые смешанные Mixed birch	–	94,4	29,2	28,9	0,4	–	–	–	3,5
Мелколиственные Small-leafs	37,0	–	–	–	–	–	–	–	1,0
Мелколиственные смешанные Mixed small-leafs	63,0	–	–	–	–	–	–	–	1,7

Примечание: прочерк – сообщество отсутствует.
Note: dash – community is absent.

нейшем оно постоянно возрастает. В период 21–60 лет сосна становится содоминантом. В возрасте 61–80 лет начинается доминирование сосны в составе древостоев. Начиная с 81 года, и до 140 лет она абсолютно преобладает. Широколиственные породы представлены липой. В целом её присутствие в составе крайне незначительно. Однако в возрасте до 10 лет её роль довольно велика. На следующей возрастной стадии степень её участия резко па-

дает, и в дальнейшем она полностью выпадает из состава древостоев.

Доля мелколиственных пород (преимущественно берёзы) в составе сообществ довольно велика. Однако динамика берёзы и осины коренным образом различается. Берёза преобладает в составе древостоев уже на начальной стадии их развития. В период 11–40 лет она становится доминантом. В дальнейшем степень её участия неуклонно сокращает-

ся и, начиная с 81 года, её доля не превышает 10%. На начальной стадии развития древостоев осина является содоминантом. Однако уже на следующей стадии она выпадает из состава древостоев и в дальнейшем отмечается лишь спорадически.

Последующий анализ таксационных описаний показал, что единый возрастной ряд состоит из сообществ различного состава (табл. 2). Для оценки специфики лесных сообществ были выделены следующие категории древостоев естественного происхождения, существенно различающихся по составу и строению [33]: сосновые чистые – в составе не менее 90% сосны; сосновые смешанные – в составе 70–80% сосны; сосново-мелколиственные – в составе 30–60% сосны, мелколиственные (преимущественно берёзы) – 30–70%; широколиственные смешанные – в составе не менее 40% широколиственных видов; берёзовые чистые – в составе не менее 90% берёзы; берёзовые смешанные – в составе 70–80% берёзы (чаще сосново-берёзовые); мелколиственные – в составе не менее 80% мелколиственных видов; мелколиственные смешанные – в составе 60–70% мелколиственных видов.

При этом каждой возрастной стадии присущ определённый спектр сообществ. Самые молодые древостои (до 10 лет) характеризуются преобладанием смешанных мелколиственных сообществ. На следующей стадии явно преобладают смешанные березняки, появляются широколиственные древостои. В возрасте 21–40 лет широко распространены сообщества с участием сосны, которые становятся преобладающими на следующей стадии.

В возрасте свыше 60 лет появляются чистые сосняки. Далее их роль продолжает возрастать, а на последних стадиях (свыше 101 года) все древостои представлены исключительно чистыми сосняками.

В составе подроста наиболее распространёнными породами являются берёза и липа (табл. 3). Значительно меньше площадь, на которой отмечен подрост сосны. Дуб отмечается редко. Развитие подроста начинается при достижении древостоями возраста 61–80 лет. В дальнейшем площадь, занимаемая подростом, растёт довольно быстро, его видовой состав подвержен значительным изменениям. Наибольшим распространением на стадии 81–100 лет характеризуются берёза и липа. В возрасте 101–120 лет подрост сосны, берёзы и липы занимает одинаковые площади. В возрасте свыше 121 года отмечено преобладание соснового и берёзового подроста.

В составе подлеска отмечено 5 видов. Явно выражено преобладание рябины (*Sorbus aucuparia* L.). Слабо представлены бересклет (*Euonymus verrucosa* Scop.) и лещина (*Corylus avellana* L.). Начало формирования подлеска отмечено на стадии 21–40 лет. В это время абсолютно преобладает ракитник (*Chamaecytisus ruthenicus* (Fisch.)). На следующей стадии в составе подлеска появляется крушина ломкая (*Frangula alnus* Mill.), которая, наряду с рябиной и ракитником, сохраняет значительную роль вплоть до последних возрастных стадий.

В травостое в целом преобладают несколько видов: орляк (*Pteridium aquilinum* (L.)), вейник наземный (*Calamagrostis epigeios* (L.) Roth), ландыш (*Convallaria majalis* L.), брус-

Таблица 3 / Table 3

Распространение подроста и подлеска различных видов в возрастном ряду, % от общей площади древостоев / Spreading of the undergrowth at the age row, % of the common square of timber stands

Вид / Species	Возраст, лет / Age, year								Среднее Average
	< 10	11–20	21–40	41–60	61–80	81–100	101–120	121–140	
<i>Pinus sylvestris</i> L.	–	–	–	–	11,0	–	11,0	100,0	8,3
<i>Betula pendula</i> Roth	–	–	–	–	22,8	24,9	11,8	100,0	20,5
<i>Quercus robur</i> L.	–	–	–	–	4,0	–	–	–	2,7
<i>Tilia cordata</i> Mill.	–	–	–	–	12,2	24,9	11,8	–	12,9
<i>Euonymus verrucosa</i> Scop.	–	–	–	–	4,4	–	–	–	3,0
<i>Frangula alnus</i> Mill.	–	–	–	18,2	29,9	–	–	100,0	21,8
<i>Corylus avellana</i> L.	–	–	–	–	8,4	–	–	–	5,8
<i>Sorbus aucuparia</i> L.	–	–	–	40,6	52,7	49,8	100,0	100,0	51,3
<i>Chamaecytisus ruthenicus</i> (Fisch. ex Woloszcz.)	–	–	100,0	–	11,5	8,4	77,2	–	13,2

Примечание: прочерк – вид отсутствует.

Note: dash – species is absent.

Таблица 4 / Table 4

Распространение доминантов напочвенного покрова в возрастном ряду, % от покрытой лесом площади / Spreading of the ground cover dominants at the age row, % of the common square of timber stands

Вид / Species	Возраст, лет / Age, year								Среднее Average
	< 10	11–20	21–40	41–60	61–80	81–100	101–120	121–140	
<i>Vaccinium vitis-idaea</i> L.	–	–	–	–	31,3	88,7	100,0	–	40,4
<i>Calamagrostis epigeios</i> (L.) Roth	100,0	100,0	–	65,0	66,6	47,1	11,8	–	62,0
<i>Calamagrostis canescens</i> (Web.)	24,3	13,1	–	4,5	2,8	6,0	–	–	11,2
<i>Geranium sylvaticum</i> L.	41,9	–	–	–	11,8	18,1	–	–	12,2
<i>Pyrola rotundifolia</i> L.	–	–	–	6,3	15,3	–	–	100,0	11,1
<i>Rubus saxatilis</i> L.	–	4,0	–	–	15,8	24,9	–	–	15,0
<i>Antennaria dioica</i> (L.)	–	–	–	–	16,2	4,1	–	–	11,9
<i>Polygonatum officinale</i> (L.)	–	–	–	29,4	2,4	6,8	–	–	4,2
<i>Convallaria majalis</i> L.	–	96,0	–	17,5	51,9	31,7	11,8	–	44,2
<i>Melampyrum nemorosum</i> L.	–	–	–	29,4	33,7	–	–	–	24,8
<i>Pteridium aquilinum</i> (L.) Kuhn	58,1	4,0	–	53,8	51,5	24,9	22,8	–	45,1
<i>Orthilia secunda</i> (L.)	–	–	–	–	21,7	4,1	–	100,0	15,8
<i>Carex pilosa</i> Scop.	–	96,0	100,0	28,7	9,0	23,8	77,2	–	17,3
<i>Vaccinium myrtillus</i> L.	–	4,0	–	18,2	25,7	24,9	89,0	100,0	27,0
Зелёные мхи / <i>Hylocomiaceae</i>	100,0	96,0	100,0	64,3	53,2	75,1	–	100,0	57,1
Лишайники / <i>Cladoniaceae</i>	–	–	–	12,6	1,4	4,3	–	–	2,3

Примечание: прочерк – вид отсутствует.
Note: dash – species is absent.

ника (*Vaccinium vitis-idaea* L.) и черника (*Vaccinium myrtillus* L.) (табл. 4). Однако его видовой состав значительно варьирует на различных стадиях развития сообществ.

В зависимости от приуроченности к тем или иным стадиям можно выделить несколько групп видов. Явно приурочены к начальным стадиям герань (*Geranium sylvaticum* L.), ландыш (*Convallaria majalis* L.) и вейник (*Calamagrostis epigeios* (L.) Roth). Орляк (*Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn) и осока волосистая (*Carex pilosa* Scop.), широко распространённые уже на ранних стадиях, сохраняют своё присутствие вплоть до 120 лет. Брусника (*Vaccinium vitis-idaea* L.), черника (*Vaccinium myrtillus* L.), грушанка (*Pyrola rotundifolia* L.) и ортилия (*Orthilia secunda* (L.)) появляются на средних стадиях, постепенно наращивая своё присутствие, и господствуют в составе травостоев заключительных стадий. Костяника (*Rubus saxatilis* L.), купена (*Polygonatum officinale* (L.)), марьянник дубравный (*Melampyrum nemorosum* L.) и кошачья лапка (*Antennaria dioica* (L.)) характерны для сообществ среднего возраста.

Для свежих боров необходимо отметить высокую роль зелёных мхов. Гораздо реже доминируют лишайники. В возрастном ряду отмечено широкое варьирование степени раз-

вития яруса мхов и лишайников. Моховой покров хорошо развит уже на первой возрастной стадии. В сообществах среднего возраста степень распространения мхов заметно снижается, но на заключительной стадии отмечен хорошо развитый моховой ярус.

Роль лишайников довольно заметна в возрасте 41–60 лет. В дальнейшем степень их распространения резко снижается и в сообществах, возраст которых превышает 100 лет, они полностью отсутствуют.

Изменение насаждений свежего бора в результате хозяйственной деятельности можно описать следующим образом. После рубки коренных сосновых лесов формировались чистые сосновые древостои с небольшой примесью мелколиственных пород. Под пологом изреженных выборочными рубками сосняков формируется берёзовый подрост. Вырубка этих древостоев привела к формированию значительных площадей сообществ смешанного состава. К этому времени в экотопе происходят заметные изменения. Наличие примеси лиственных пород способствовало заметному увеличению плодородия почв. Под пологом мелколиственных и смешанных древостоев начинается развитие подроста широколиственных деревьев (прежде всего, липы). Ведущую роль приобретает вегетативное возобновление

лиственных пород, а молодое поколение берёзы продуцирует огромное количество семян.

Лесные сообщества следующего поколения возникают уже на месте различных по составу производных лесов второго поколения. В результате на первой возрастной стадии сосна полностью выпадает из состава древостоев.

Анализ данных динамики всех ярусов растительности позволил разделить рассматриваемый возрастной ряд на периоды, каждый из которых, в свою очередь, состоит из отдельных фаз (рис.).

Первый период продолжительностью до 20 лет характеризуется преобладанием в составе древостоев лиственных пород с небольшой примесью сосны. Подрост и подлесок полностью отсутствуют. В начальной фазе в возрасте до 10 лет формируются древостои средней сомкнутости, в составе которых преобладают мелколиственные породы, представленные примерно одинаково, при этом значительна доля липы. В напочвенном покрове хорошо развит ярус мхов. В составе густого травостоя доминирует вейник наземный с примесью орляка и герани. Следующая фаза от 11 до 20 лет характеризуется преобладанием берёзы. Доля липы в составе значительно сокращается, а осина полностью отсутствует. Появляется примесь сосны. В этой фазе древостои достигают значительной сомкнутости. В составе травостоя доминируют ландыш, вейник и осока волосистая.

В течение второго периода от 21 до 80 лет происходит коренное изменение всех компонентов насаждений. Доля сосны в составе

древостоев значительно возрастает, а доля лиственных видов соответственно уменьшается. При этом широколиственные виды исчезают практически полностью. В течение этого периода древостои заметно изреживаются. Сосна, благодаря интенсивному росту в высоту к концу периода обгоняет берёзу и осину. Начинает развиваться кустарниковый ярус. Появляется ярус кустарничков, состоящий из брусники и черники. В третьей фазе (21–40 лет), характеризующейся преобладанием берёзы, появляется подлесок, состоящий из ракитника русского. Из состава травостоя выпадает вейник. Доминантом становится осока волосистая. На протяжении четвёртой фазы (41–80 лет) сосна становится доминантом. К концу этой фазы начинает формироваться подрост, преимущественно берёзовый, со значительной примесью сосны и липы. Кардинально изменяется состав подлеска, в котором доминируют рябина и крушина ломкая. В составе травостоя содоминируют несколько растений: орляк, ландыш и вейник. Среди доминантов появляются ортилия, грушанка, марьянник дубравный, костяника и кошачья лапка. Становится заметным присутствие лишайников.

Третий период – полное господство сосны. Примесь всех видов лиственных деревьев сокращается до минимума. Это происходит в результате отпада мелколиственных пород, в то время, как рост сосны в высоту продолжается. Период состоит из одной фазы (пятой). Его продолжительность составляет

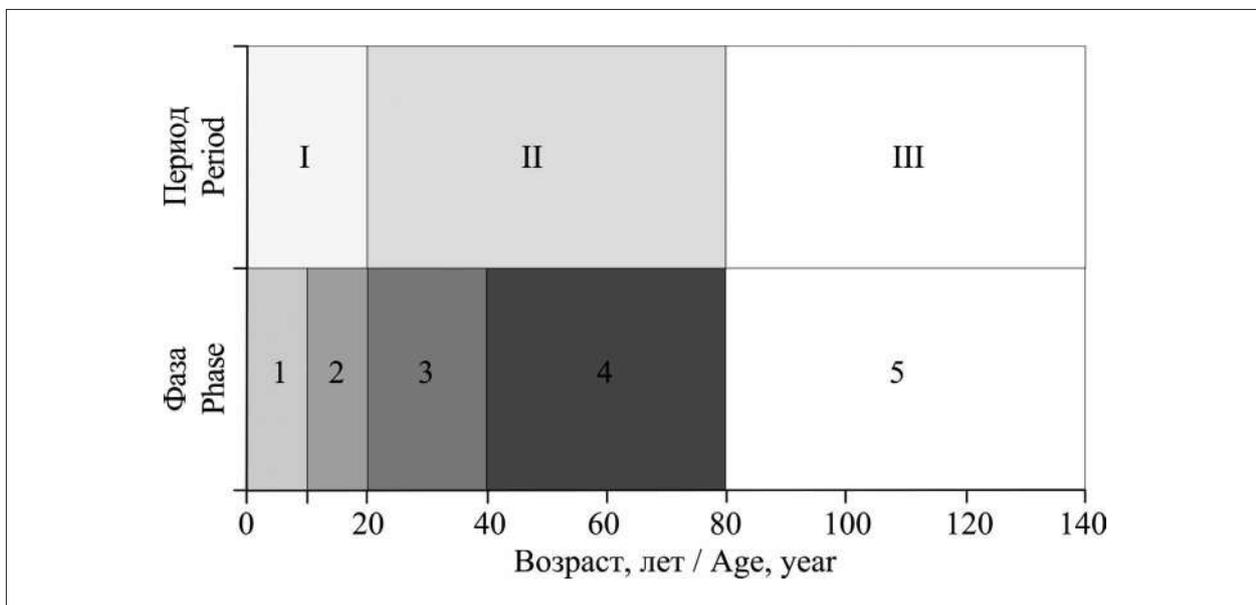


Рис. Схема возрастного ряда в условиях свежего бора (описание в тексте)
 Fig. Sheme of the age row at the fresh pinery conditions (description in text)

60 лет. Распространение подроста значительно. При этом широко распространён подрост сосны. Одновременно происходит интенсивное развитие подлеска, в составе которого вновь увеличивается роль ракитника. Возрастает и степень доминирования рябины и крушины. Формируется хорошо развитый ярус мхов, но лишайники полностью исчезают. Наиболее выражен ярус кустарничков, состоящий из брусники и черники. Из состава травостоя выпадает вейник, доминируют грушанка и ортилия.

Заключение

Анализ полученных данных позволил выявить в экотопах, соответствующих свежему бору, различные по составу и строению сообщества. Объединение насаждений различного возраста во временной ряд показало, что каждой возрастной стадии присущ определённый спектр сообществ. После начала применения сплошнолесосечных рубок площадь, занятая лиственными деревьями (прежде всего, берёзой), постоянно росла. Одновременно происходило задержание образовавшихся вырубков. Следствием масштабного применения рубок промежуточного пользования, санитарных и добровольно-выборочных стало формирование изреженных сосновых древостоев высокого возраста. Обильное плодоношение молодых мелколиственных древостоев обусловило возникновение в старовозрастных сосняках яруса из лиственных деревьев (преимущественно берёзы). Таким образом, проведённое исследование показало, что полученный возрастной ряд представляет собой ряд трансформации лесных сообществ. Доказательствами этому служат как широкое распространение в сообществах молодого возраста теневыносливых видов, характерных для поздних стадий сукцессии, так и возникновение в древостоях высокого возраста яруса с преобладанием светолюбивых видов – берёзы и осины. Эти факторы вызвали ухудшение условий естественного возобновления сосны. В результате к настоящему времени возможность формирования сосновых древостоев путём естественного возобновления почти полностью исключена.

Нарушение хода лесообразовательного процесса привело к масштабной смене коренных насаждений на производные. При этом среди наиболее молодых сообществ, наряду с мелколиственными, довольно значительную площадь занимают древостои с преобладанием широколиственных пород.

Литература

1. Дыренков С.А. Структура и динамика таёжных ельников. Л.: Наука, 1984. 173 с.
2. Абатуров А.В., Антюхина В.В. Динамика хвойных лесов Подмосковья. М.: Наука, 2000. 222 с.
3. Абатуров А.В., Меланхолин П.Н. Естественная динамика леса на постоянных пробных площадях в Подмосковье. Тула: Гриф и К, 2004. 336 с.
4. Борисов А.Н., Иванов В.В. Имитационное моделирование роста сосновых древостоев // Сибирский лесной журнал. 2022. № 3. С. 40–47.
5. Keren S., Diaci J., Motta R., Govedar Z. Stand structural complexity of mixed old-growth and adjacent selection forests in the dinaric mountains of Bosnia and Herzegovina // Forest Ecology and Management. 2017. V. 400. P. 531–541.
6. Borisov A.N., Ivanov V.V. *Pinus sylvestris* L. growth depending on available resources in ecological niche // Environmental Analysis & Ecology Studies. 2019. V. 5. No. 5. P. 571–573.
7. Schleeuwis K.G., Moisen G.G., Schroeder T.A., Toney C., Freeman E.A., Goward S.N., Huang C., Dungan J.L. US national maps attributing forest change: 1986–2010 // Forests. 2020. V. 11. No. 6. P. 653–672.
8. Кудрявцев А.Ю. Типы леса возвышенности «Сурская Шишка» // Лесохозяйственная информация. 2020. № 3. С. 27–45.
9. Пукинская М.Ю. Реконструкция динамики темных хвойных лесов Тебердинского заповедника и перспективы их естественного восстановления после массового усыхания // Поволжский экологический журнал. 2022. № 4. С. 431–451.
10. Jaloviar P., Saniga M., Kucbel S., Pittner J., Vencurik J., Dovciak M. Seven decades of change in a European old-growth forest following a stand-replacing wind disturbance: A long-term case study // Forest Ecology and Management. 2017. V. 399. P. 197–205.
11. Janda P., Trotsiuk V., Mikoláš M., Bače R., Nagel T.A., Seidl R., Seedre M., Morrissey R.C., Kucbel S., Jaloviar P., Jasík M., Vysoký J., Šamonil P., Čada V., Mrhalová H., Lábusová J., Nováková M.H., Rydval M., Matěju L., Svoboda M. The historical disturbance regime of mountain Norway spruce forests in the Western Carpathians and its influence on current forest structure and composition // Forest Ecology and Management. 2017. V. 388. P. 67–78.
12. Seidl R., Thom D., Kautz M., Martin-Benito D., Peltoniemi M., Vacchiano G., Wild J., Ascoli D., Petr M., Honkaniemi J., Lexer M.J., Trotsiuk V., Mairota P., Svoboda M., Fabrika M., Nagel T.A., Reyer C.P.O. Forest disturbances under climate change // Nature Climate Change. 2017. V. 7. P. 395–402.
13. Fornal-Pieniak B., Ollik M., Schwerk A. Impact of different levels of anthropogenic pressure on the plant species composition in woodland sites // Urban Forestry & Urban Greening. 2019. V. 38. P. 295–304.

14. Keeley J.E., van Mantgem P., Falk D.A. Fire, climate and changing forests // *Nature Plants*. 2019. V. 5. No. 8. P. 774–775.
15. Thrippleton T., Lüscher F., Bugmann H. Climate change impacts across a large forest enterprise in the Northern Pre-Alps: Dynamic forest modelling as a tool for decision support // *European Journal of Forest Research*. 2020. V. 139. No. 3. P. 483–498.
16. Oparin M.L., Kudryavtsev A.Yu., Oparina O.S., Mamaev A.B. Invasion of the Black woodpecker (*Dryocopus martius* L.) (Picidae, Aves) into the Dyakovskiy (Saltovskiy) forest on the array of sands near the Yeruslan River // *Povolzhskiy Journal of Ecology*. 2021. No. 1. P. 97–106.
17. Maesano M., Ottaviano M., Lidestav G., Lasserre B., Matteucci G., Mugnozsa G.S., Marchetti M. Forest certification map of Europe // *iForest – Biogeosciences and Forestry*. 2018. V. 11. No. 4. P. 526–533.
18. Nigatu M. Review on role of forest certification // *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*. 2019. V. 18. No. 4. Article No. 555992.
19. Kumar Dh., Thakur C.L., Bhardwaj D.R., Sharma N., Sharma H., Sharma P. Sustainable forest management a global review // *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2021. V. 10. No. 1. P. 2521–2528.
20. Маслов А.А. Динамический тренд в заповедных лесах центра Русской равнины и анализ причин сукцессионной динамики популяций растений // *Экология популяций: структура и динамика*. 1995. № 2. С. 643–655.
21. Мирин Д.М., Тиходеева М.Ю. Изменения растительности дубравы «Лес на Ворскле» заповедника Белогорье за 60 лет // *Ботанический журнал*. 2020. Т. 105. № 7. С. 672–686.
22. Пукинская М.Ю. О происхождении древостоев неморальных ельников Центрально-Лесного заповедника // *Ботанический журнал*. 2020. Т. 105. № 12. С. 1191–1206.
23. Пукинская М.Ю. Смена пород в неморальных ельниках Центрально-Лесного заповедника // *Поволжский экологический журнал*. 2020. № 4. С. 459–476.
24. Методические рекомендации по проведению государственной инвентаризации лесов. Утверждены приказом № 472 Рослесхоза от 10.11.2011. М., 2011. С. 119–120.
25. Григорьевская А.Я., Горбунова Ю.С., Девятова Т.А. Фиторазнообразие как индикатор восстановления фации *Pinus sylvestris* L. Усманского бора после лесного пожара // *Теоретическая и прикладная экология*. 2022. № 3. С. 192–198.
26. Курнаев С.Ф. Основные типы леса средней части Русской равнины. М.: Наука, 1968. 354 с.
27. Кудрявцев А.Ю. Динамика экосистем свежей субори центра Приволжской возвышенности // *Поволжский экологический журнал*. 2022. № 3. С. 279–291.
28. Кудрявцев А.Ю., Опарин М.Л., Мамаев А.Б., Опарина О.С. Состояние колючих березняков Южного Зауралья в зоне высокой антропогенной нагрузки на природные экосистемы // *Поволжский экологический журнал*. 2020. № 4. С. 427–441.
29. Санников С.Н., Петрова И.В., Санникова Н.С., Кочубей А.А., Санников Д.С. Дивергенция биогеоценозов в пределах типов сосновых лесов // *Экология*. 2017. № 4. С. 282–291.
30. Санников С.Н. Эколого-генетическая классификация типов леса на основе экодинамических рядов развития биогеоценозов // *Сибирский лесной журнал*. 2019. № 1. С. 3–19.
31. Черепанов С.К. Сосудистые растения России и сопредельных государств. СПб.: Мир и семья-95, 1995. 992 с.
32. Курнаев С.Ф. Основные типы леса средней части Русской равнины. М.: Наука, 1968. 354 с.
33. Лесное хозяйство: терминологический словарь / Под ред. А.Н. Филиппчука. М.: ВНИИЛМ, 2002. 480 с.

References

1. Dyrenkov S.A. Structure and dynamics of taiga spruce forests. Leningrad: Nauka, 1984. 173 p. (in Russian).
2. Abaturov A.V., Antyukhina V.V. Dynamics of coniferous forests of the Moscow Region. Moskva: Nauka, 2000. 222 p. (in Russian).
3. Abaturov A.V., Melankholin P.N. Natural dynamics of the forest on permanent trial areas in the Moscow Region. Tula: Grif i K, 2004. 336 p. (in Russian).
4. Borisov A.N., Ivanov V.V. Simulation modeling of the growth of pine stands // *Sibirskij Lesnoj Zurnal*. 2022. No. 3. P. 40–47 (in Russian). doi: 10.15372/SJFS20220305
5. Keren S., Diaci J., Motta R., Govedar Z. Stand structural complexity of mixed old-growth and adjacent selection forests in the dinaric mountains of Bosnia and Herzegovina // *Forest Ecology and Management*. 2017. V. 400. P. 531–541. doi: 10.1016/j.foreco.2017.06.009
6. Borisov A.N., Ivanov V.V. *Pinus sylvestris* L. growth depending on available resources in ecological niche // *Environmental Analysis & Ecology Studies*. 2019. V. 5. No. 5. P. 571–573. doi: 10.31031/EAES.2019.05.000624
7. Schleeweis K.G., Moisen G.G., Schroeder T.A., Toney C., Freeman E.A., Goward S.N., Huang C., Dungan J.L. US national maps attributing forest change: 1986–2010 // *Forests*. 2020. V. 11. No. 6. P. 653–672. doi: 10.3390/f11060653
8. Kudryavtsev A.Yu. Forest types of the “Surskaya Shishka” upland // *Forestry Information*. 2020. No. 3. P. 27–45 (in Russian). doi: 10.24419/LHI.2304-3083.2020.3.03
9. Pukinskaya M.Yu. Reconstruction of the dynamics of the dark coniferous forests of the Teberdinsky Nature Reserve and prospects for their natural recovery after mass drying out // *Povolzhskiy Journal of Ecology*. 2022. No. 4. P. 431–451 (in Russian). doi: 10.35885/1684-7318-2022-4-431-451

10. Jaloviar P., Saniga M., Kucbel S., Pittner J., Vencurik J., Dovciak M. Seven decades of change in a European old-growth forest following a stand-replacing wind disturbance: A long-term case study // *Forest Ecology and Management*. 2017. V. 399. P. 197–205. doi: 10.1016/j.foreco.2017.05.036
11. Janda P., Trotsiuk V., Mikoláš M., Bače R., Nagel T.A., Seidl R., Seedre M., Morrissey R.C., Kucbel S., Jaloviar P., Jasík M., Vysoký J., Šamonil P., Čada V., Mrhalová H., Lábusová J., Nováková M.H., Rydval M., Matěju L., Svoboda M. The historical disturbance regime of mountain Norway spruce forests in the Western Carpathians and its influence on current forest structure and composition // *Forest Ecology and Management*. 2017. V. 388. P. 67–78. doi: 10.1016/j.foreco.2016.08.014
12. Seidl R., Thom D., Kautz M., Martin-Benito D., Peltoniemi M., Vacchiano G., Wild J., Ascoli D., Petr M., Honkaniemi J., Lexer M.J., Trotsiuk V., Mairota P., Svoboda M., Fabrika M., Nagel T.A., Reyer C.P.O. Forest disturbances under climate change // *Nature Climate Change*. 2017. V. 7. P. 395–402. doi: 10.1038/nclimate3303
13. Fornal-Pieniak B., Ollik M., Schwerk A. Impact of different levels of anthropogenic pressure on the plant species composition in woodland sites // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2019. V. 38. P. 295–304. doi: 10.1016/j.ufug.2019.01.013
14. Keeley J.E., van Mantgem P., Falk D.A. Fire, climate and changing forests // *Nature Plants*. 2019. V. 5. No. 8. P. 774–775. doi: 10.1038/s41477-019-0485-x
15. Thrippleton T., Lüscher F., Bugmann H. Climate change impacts across a large forest enterprise in the Northern Pre-Alps: Dynamic forest modelling as a tool for decision support // *European Journal of Forest Research*. 2020. V. 139. No. 3. P. 483–498. doi: 10.1007/s10342-020-01263-x
16. Oparin M.L., Kudryavtsev A.Yu., Oparina O.S., Mamaev A.B. Invasion of the Black woodpecker (*Dryocopus martius* L.) (Picidae, Aves) into the Dyakovskiy (Saltovskiy) forest on the array of sands near the Yeruslan River // *Povolzhskiy Journal of Ecology*. 2021. No. 1. P. 97–106. doi: 10.35885/1684-7318-2021-1-97-106
17. Maesano M., Ottaviano M., Lidestav G., Lasserre B., Matteucci G., Mugnozga G.S., Marchetti M. Forest certification map of Europe // *iForest – Biogeosciences and Forestry*. 2018. V. 11. No. 4. P. 526–533. doi: 10.3832/ifor2668-011
18. Nigatu M. Review on role of forest certification // *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*. 2019. V. 18. No. 4. Article No. 555992. doi: 10.19080/IJESNR.2019.18.555992
19. Kumar Dh., Thakur C.L., Bhardwaj D.R., Sharma N., Sharma H., Sharma P. Sustainable forest management a global review // *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2021. V. 10. No. 1. P. 2521–2528. doi: 10.20546/ijemas.2021.1001.292
20. Maslov A.A. Dynamic trend in the protected forests of the center of the Russian plain and analysis of the causes of successional dynamics of plant populations // *Ekologiya Populyatsiy: Struktura i Dinamika*. 1995. No. 2. P. 643–655 (in Russian).
21. Mirin D.M., Tikhodeeva M.Yu. Change of vegetation of reserved oak-wood “Les na Vorskle” during 60 years // *Botanicheskii Zhurnal*. 2020. V. 105. No. 7. P. 672–686 (in Russian). doi: 10.31857/S0006813620070078
22. Pukinskaya M.Yu. On the origin of nemoral spruce forest stands in the Central Forest Reserve // *Botanicheskii Zhurnal*. 2020. V. 105. No. 12. P. 1191–1206 (in Russian). doi: 10.31857/S0006813620120157
23. Pukinskaya M.Yu. Tree change in nemoral spruce forests of the central forest reserve // *Povolzhskiy Journal of Ecology*. 2020. No. 4. P. 459–476 (in Russian). doi: 10.35885/1684-7318-2020-4-459-476
24. Methodical Recommendations on the State Forest Inventory Conduct. Approved by Order No. 472 of the Federal Forestry Agency of 10 November 2011. Moskva, 2011. P. 119–120 (in Russian).
25. Grigoryevskaya A.Ya., Gorbunova Yu. S., Deviatova T. A. Phyto-diversity as an indicator of the restoration of the *Pinus sylvestris* L. formation of the Usman forest after a forest fire // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 3. P. 192–198 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-192-198
26. Kurnaev S.F. Main types of forest in the middle part of the Russian Plain. Moskva: Nauka, 1968. 354 p. (in Russian).
27. Kudryavtsev A.Yu. Dynamics of ecosystems of fresh subor (pine woods on sandy soils) in the central part of the Volga Upland // *Povolzhskiy Journal of Ecology*. 2022. No. 3. P. 279–291 (in Russian). doi: 10.35885/1684-7318-2022-3-279-291
28. Kudryavtsev A.Yu., Oparin M.L., Oparina O.S., Mamaev A.B., Kovalev D.V. State of split birch woods of the Southern Trans-Urals in the zone of high anthropogenic load on natural ecosystems // *Povolzhskiy Journal of Ecology*. 2020. No. 4. P. 427–441 (in Russian). doi: 10.35885/1684-7318-2020-4-427-441
29. Sannikov S.N., Petrova I.V., Sannikova N.S., Kochybei A.A., Sannikov D.S. Divergence of biogeocenoses within pine forest types // *Russian Journal of Ecology*. 2017. V. 48. No. 4. P. 340–349. doi: 10.1134/S1067413617040142
30. Sannikov S.N. Ecologic and genetic classification of forest types based on ecologic and genetic series of development of biogeocenoses // *Sibirskiy Lesnoy Zhurnal*. 2019. No. 1. P. 3–15 (in Russian). doi: 10.15372/SJFS20190101
31. Czerepanov S.K. Vascular plants of Russia and adjacent states (the former USSR). Sankt-Peterburg: Mir i sem'ia-95, 1995. 992 p. (in Russian).
32. Kurnaev S.F. The main types of forest in the middle part of the Russian Plain. Moskva: Nauka, 1968. 354 p. (in Russian).
33. Forestry: Terminology dictionary / Ed. A.N. Filipchuk. Moskva: VNIILM, 2002. 480 p. (in Russian).

Влияние различных типов поверхностно-активных веществ на эмиссию газов и микробиоту жидкой фракции навозных стоков

© 2023. Л. В. Пилип¹, к. в. н., доцент, Н. В. Сырчина², к. х. н., доцент, с. н. с.,
 Е. П. Колеватых³, к. м. н., доцент, зав. кафедрой, В. В. Рутман², м. н. с.,
¹Вятский государственный агротехнологический университет,
 610017, Россия, г. Киров, Октябрьский проспект, д. 133,
²Вятский государственный университет,
 610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
³Кировский государственный медицинский университет,
 610000, Россия, г. Киров, ул. К. Маркса, д. 112,
 e-mail: nvms1956@mail.ru, pilip_larisa@mail.ru, ecolab2@gmail.com

Разнообразные поверхностно-активные вещества (ПАВ) находят широкое применение в практике современного промышленного животноводства. В составе моющих средств и фармакологических ветеринарных препаратов ПАВ неизбежно попадают в навозные стоки (НС), что приводит к изменению свойств последних. Изучение влияния различных типов ПАВ на газовыделение и микробиоту жидкой фракции (ЖФ) НС выполняли на примере ПАВ с различной биоцидной активностью: лауретсульфата натрия – анионоактивное ПАВ (АПАВ), оксида лаурилдиметиламина – неионогенное ПАВ (НПАВ) и бензалкония хлорида – катионоактивное ПАВ (КПАВ). Исследования проводили в лабораторных условиях. Общее время наблюдений с момента внесения добавок в ЖФ (0,01 г на 1 л) составило 14 суток. Полученные результаты показали, что под влиянием ПАВ изменяется динамика выделения парниковых газов (CH₄ и CO₂) и запахообразующих веществ (H₂S, NH₃, меркаптанов), а также состав микробиоты биоплёнок и бактериопланктона. Динамика выделения CH₄ отличается от динамики выделения других газов. Применение КПАВ приводит к постепенному увеличению эмиссии CH₄ через неделю после внесения, что может быть связано с повышением проницаемости цитоплазматических мембран метаногенных архей, отличающихся повышенной устойчивостью к воздействию химических веществ. Внесение в ЖФ различных типов ПАВ оказывает различное влияние на динамику выделения запахообразующих веществ, при этом период активной эмиссии меркаптанов становится более продолжительным. В варианте эксперимента с добавкой НПАВ наблюдалось наиболее высокое содержание этилмеркаптана. Существенных различий в воздействии низких концентраций различных ПАВ на микробиоту ЖФ выявлено не было, однако по комплексу показателей добавка АПАВ оказала более выраженное бактериостатическое воздействие. Наиболее толерантными к воздействию всех типов ПАВ оказались кластридии, занимающие доминирующее положение в составе микробиоты биоплёнок и бактериопланктона. Второе место по численности в биоплёнках ЖФ занимали грибы.

Ключевые слова: навозные стоки, поверхностно-активные вещества, микробиота, биоплёнки, бактериопланктон, эмиссия парниковых газов, запах.

Influence of various types of surfactants on gas emissions and microbiota of the liquid fraction of manure effluents

© 2023. L. V. Pilip¹ ORCID: 0000-0001-9695-7146, N. V. Syrchina² ORCID: 0000-0001-8049-6760,
 E. P. Kolevatykh³ ORCID: 0000-0001-6147-3555, V. V. Rutman² ORCID: 0000-0002-9025-3487,
¹Vyatka State Agrotechnological University,
 133, Oktyabrsky Prospekt, Kirov, Russia, 610017,
²Vyatka State University,
 36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
³Kirov State Medical University,
 112, Karla Marksa St., Kirov, Russia, 610000,
 e-mail: nvms1956@mail.ru, pilip_larisa@mail.ru, ecolab2@gmail.com

Various surfactants are widely used in modern industrial animal husbandry. As part of detergents and pharmaceutical veterinary preparations, surfactants inevitably fall into manure effluents (ME), resulting in a change in the

properties of ME. The study of the effect of various types of surfactants on the gas release and microbiota of the liquid fraction (LF) of ME was carried out on the example of surfactants with different biocidal activity: sodium laureth sulfate – anionactive surfactant (AS), lauryldimethylamine oxide – nonionic surfactant (NS) and benzalkonium chloride – cationic surfactant (CS). The studies were conducted under laboratory conditions. The total observation time since the introduction of additives in the LF (0,01 g per 1 liter) was 14 days. The obtained data shows changes in the dynamics of greenhouse gases (CH₄ and CO₂) and odor-forming substances (H₂S, NH₃, RSH) emission, as well as in the composition of the microbiota of biofilms and bacterioplankton, under the influence of surfactants. The dynamics of the CH₄ emission differ from those of other gases. The use of CS leads to a gradual increase in CH₄ emission a week after application. This may be due to increased permeability of the cytoplasmic membranes of methanogenic archaea with increased chemical resistance. The application of various types of surfactants into the LF has different effects on the dynamics of the odor-forming substances emission, and the active emission period of mercaptans becomes longer. The highest level of ethyl mercaptan was observed in the option with NS. There was no significant difference in the effect of low concentrations of various surfactants on the microbiota of LF, however the AS has a more pronounced bacteriostatic effect on set of indicators. The most tolerant to the effects of all types of surfactants were Clostridia, which dominates the microbiota biofilms and bacterioplankton. Fungi were the second most abundant in biofilms of the LF.

Keywords: manure effluents, surfactants, microbiota, biofilms, bacterioplankton, greenhouse gas emission, odor.

Для современного промышленного животноводства характерно широкое использование разнообразных поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые входят в состав очищающих и дезинфицирующих средств, фармакологических препаратов, кормовых добавок, композиций для подавления неприятного запаха [1]. После использования основная доля соответствующих материалов попадает в навозные стоки (НС). Наличие ПАВ приводит к изменению поверхностных свойств жидких гетерогенных систем, трансформации характерной для НС microbioty, выраженным солюбилизирующему и эмульгирующему эффектам, затрудняющим разделение НС на жидкую и твердую фракции. Следствием снижения поверхностного натяжения на границе НС/воздух становится повышенная эмиссия газообразных веществ, образующихся в результате микробиологической деструкции органических соединений. При минерализации органических компонентов навоза в атмосферный воздух поступают как парниковые газы (CH₄, CO₂, N₂O), так и разнообразные запахообразующие вещества (ЗОВ), оказывающие негативное влияние на экологическую обстановку вблизи животноводческих комплексов [2–4]. Состав и количество выделяемых из НС газов зависят от качественного и количественного состава microbioty [5, 6]. Под влиянием различных типов ПАВ активность микроорганизмов-аммонификаторов может как увеличиваться, так и снижаться. Катионактивные ПАВ (КПАВ) проявляют выраженные бактерицидные свойства [7–9]. Аналогичные свойства характерны и для амфифильных ПАВ, что позволяет использовать их в качестве дезинфицирующих средств [10]. Неионогенные ПАВ (НПАВ) могут оказывать как стимулирующее влияние на активность микроорганизмов (МО) [11, 12], так и пода-

влять их жизнедеятельность [13] или снижать возможность формирования биопленок [14]. Влияние аниоактивных ПАВ (АПАВ) на microbioty также неоднозначно [15]. Экспериментальные исследования свидетельствуют о том, что загрязнение сточных вод этим типом сурфактантов с одной стороны оказывает ингибирующее воздействие на процессы биологической очистки, но с другой АПАВ могут подвергаться биоразложению, которое наиболее успешно идет в аэробных условиях [16]. Механизм биоцидного действия ПАВ обычно связывают с нарушением проницаемости и дезорганизацией цитоплазматических (внутренних) мембран, а также снижением активности связанных с мембранами клеточных ферментов [17, 18].

Следует отметить, что НС являются сложным объектом для проведения исследований (многокомпонентный, гетерогенный, не стабильный во времени состав, наличие патогенной и условно-патогенной microbioty, неприятный запах). Очевидно, именно поэтому в опубликованных источниках очень мало данных, характеризующих влияние различных ПАВ на процессы газовой выделенной и microbioty побочных продуктов животноводства.

Цель настоящей работы состояла в изучении влияния различных типов ПАВ на эмиссию парниковых газов и запахообразующих веществ, а также microbioty жидкой фракции навозных стоков свиноводческого предприятия.

Объекты и методы исследования

Для проведения исследований использовали жидкую фракцию (ЖФ) свиных НС, предоставленную одним из крупных свиноводческих предприятий Кировской облас-

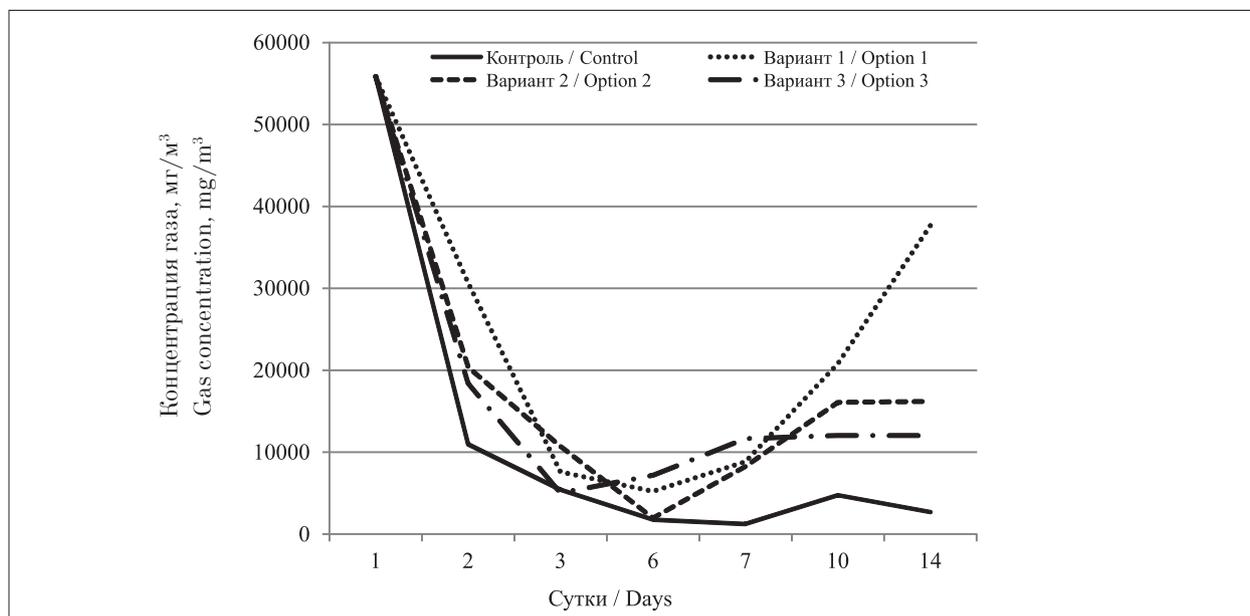


Рис. 1. Динамика выделения CH₄ из жидкой фракции навозных стоков. Здесь и далее: контроль – жидкая фракция (ЖФ) без добавок; вариант 1 – ЖФ + катионактивное поверхностно-активное вещество (ПАВ); вариант 2 – ЖФ + неионогенное ПАВ; вариант 3 – ЖФ + аниоактивное ПАВ
Fig. 1. Dynamics of CH₄ emission from the liquid fraction of manure effluents. Here and below: control – liquid fraction (LF) without additives; option 1 – LF + cationic surfactant; variant 2 – LF + nonionic surfactant; option 3 – LF + anionic surfactant

разующей сложные синтрофные ассоциации между различными группами МО [23, 24]. На вторые-третьи сутки наблюдений выделение CH₄ во всех вариантах эксперимента, включая контроль, резко снизилось (рис. 1). Скорее всего данный эффект обусловлен насыщением ЖФ кислородом при наполнении ёмкостей.

На протяжении всего периода наблюдений во всех вариантах содержание метана в выделяемых газах (ВГ) находилось на более низком уровне, чем в начале эксперимента, что можно объяснить регулярным поступлением кислорода в экспериментальные ёмкости во время измерения состава газов. В вариантах с добавками ПАВ концентрация CH₄ была несколько выше, чем в контроле. Особенно отчётливо данная тенденция проявилась к концу периода наблюдений в варианте 1 (различия между вариантом 1 с добавкой КПАВ и остальными вариантами на 14-е сутки статистически значимы). Метаногенные археи, играющие ключевую роль в синтезе CH₄, проявляют повышенную устойчивость к действию ПАВ, включая КПАВ, что обусловлено спецификой строения мембран этой группы МО. Мембраны архей характеризуются меньшей проницаемостью по отношению к компонентам внешней среды [25]. Возможно сурфактанты не приво-

дят к существенному повреждению клеточных мембран архей, но способствуют повышению их проницаемости, за счёт чего активизируется метаболизм и выделение CH₄.

Динамика выделения CO₂ из ЖФ существенно отличалась от динамики выделения CH₄ (рис. 2).

Во всех вариантах на протяжении первых двух суток наблюдалось увеличение эмиссии углекислого газа с последующим снижением на 6–7 сут, а затем некоторым ростом этого показателя к концу эксперимента. Эмиссия CO₂ в вариантах с добавками ПАВ на протяжении первых шести суток наблюдений была ниже, чем в контроле, что можно объяснить неблагоприятным воздействием сурфактантов на клеточные мембраны прокариот, метаболизирующих органические вещества, а также депрессией метаногенеза в первой половине периода наблюдений. Известно, что большинство метаногенов для синтеза CH₄ используют CO₂ и H₂: CO₂ + 4H₂ → CH₄ + 2H₂O [26].

К наиболее значительному снижению содержания CO₂ в ВГ на протяжении всего эксперимента привела добавка АПАВ. Неионогенное ПАВ оказало наименьшее влияние на данный показатель, причём на 14-е сутки содержание CO₂ в ВГ в варианте 2 было в 2 раза выше, чем в контроле (различия статистиче-

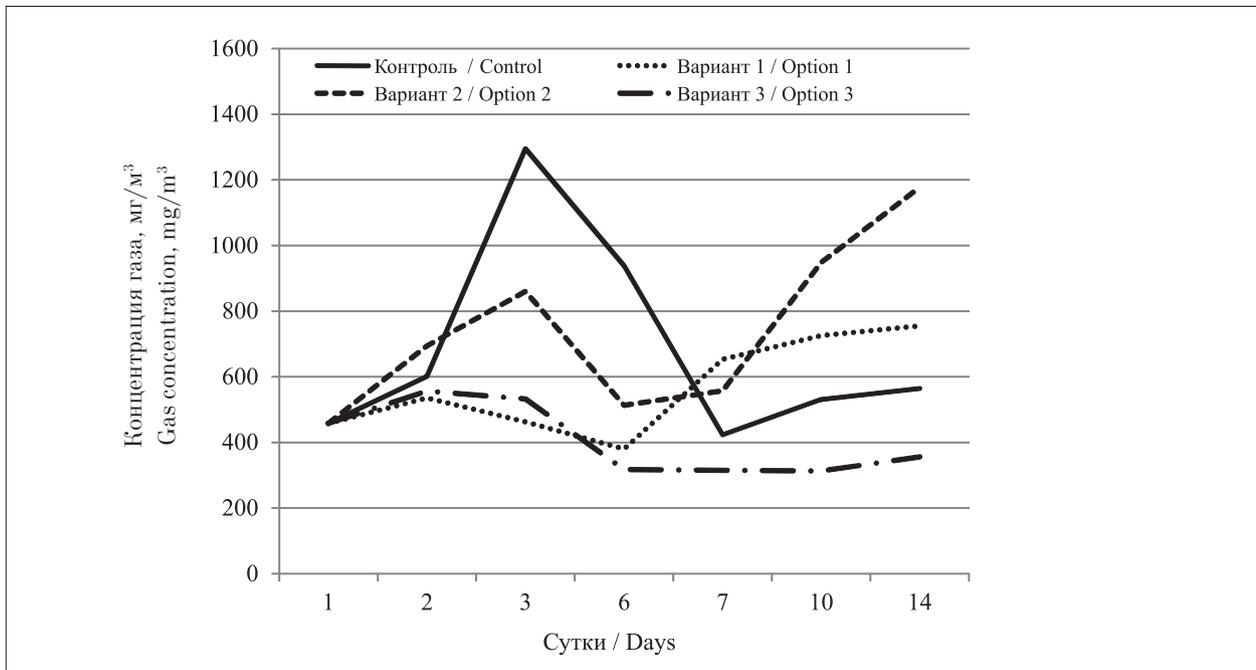


Рис. 2. Динамика выделения CO₂ из жидкой фракции навозных стоков
Fig. 2. Dynamics of CO₂ emission from the liquid fraction of manure effluents

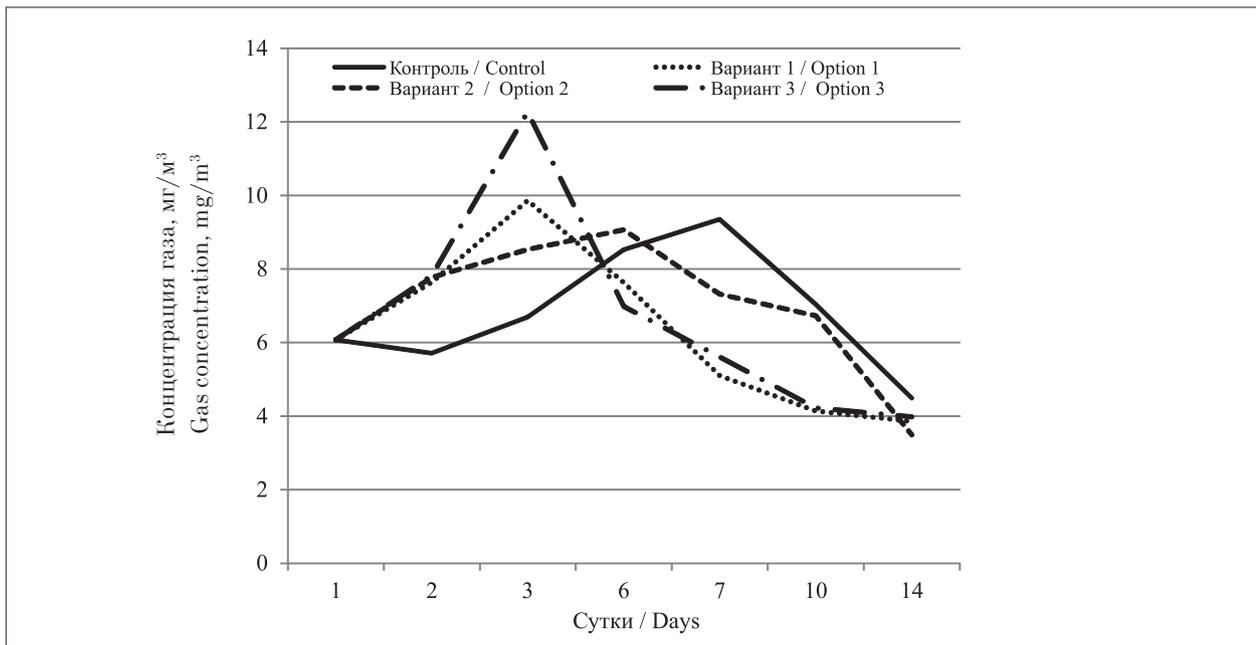


Рис. 3. Динамика выделения NH₃ из жидкой фракции навозных стоков
Fig. 3. Dynamics of NH₃ emission from the liquid fraction of manure effluents

ски значимо). На поверхности ЖФ с добавкой НПАВ к 14-м суткам сформировалась самая плотная биоплёнка.

Известно, что аэробная гетеротрофная микробиота биоплёнок принимает активное участие в окислении органических соединений с выделением CO₂ [27, 28]. Условия эксперимента (ограниченное освещение и высокое содержание органических веществ в

ЖФ) способствовали развитию гетеротрофных МО. В отличие от парниковых газов, динамика выделения различных ЗОВ во всех вариантах эксперимента имела некоторые общие закономерности: рост эмиссии в первые дни наблюдений и постепенное снижение этого показателя к концу эксперимента. В контрольном варианте максимальное содержание NH₃ в выделяемых из ЖФ газах отмечено

на 7-е сутки, в вариантах с добавками КПАВ и АПАВ – на третьи сутки (рис. 3).

Добавка НПАВ привела к некоторому сглаживанию пика эмиссии NH_3 . Возможно соответствующий эффект обусловлен активным использованием NH_3 в качестве источника азота в консорциумах МО плотных биоплёнок, характерных для варианта 2.

Обработка ЖФ сурфактантами способствовала существенному повышению эмиссии H_2S на 6-е сутки наблюдений по сравнению с контролем (рис. 4). Наиболее отчетливо этот эффект прослеживался в вариантах с добавками КПАВ и АПАВ. Во второй половине эксперимента наблюдалось резкое снижение эмиссии H_2S на фоне заметного роста эмиссии CH_4 . Известно, что в анаэробных биохимических процессах, сопровождающихся образованием CH_4 и H_2S , микробиота жёстко конкурирует за весьма ограниченные ресурсы водорода, что хорошо объясняет наблюдаемые закономерности.

Высокий уровень эмиссии тиолов (R-SH), важнейших компонентов неприятного запаха в контрольном варианте, наблюдался на протяжении первых трёх суток эксперимента (рис. 5). Затем этот показатель резко снижался и стабилизировался. В вариантах с добавками ПАВ содержание R-SH в ВГ в первой половине наблюдений было ниже, а во второй выше, чем в контроле, т. е. в присутствии ПАВ период активного выделения соответствующих ЗОВ становится более продолжительным.

Влияние НПАВ на общую эмиссию меркаптанов оказалось незначительным, однако этот сурфактант оказал стимулирующее действие на эмиссию этантиола, концентрация которого в варианте 3 была выше, чем в других вариантах (рис. 6).

Этантиол является одним из продуктов распада серосодержащих аминокислот в анаэробных условиях. Самое высокое содержание этилмеркаптана во 2 варианте (рис. 6) сопровождалось относительно низким содержанием H_2S и CH_4 в ВГ (рис. 4).

Характер и интенсивность газовой выделения, наблюдающегося при микробиологической деструкции органогенных субстратов, определяются особенностями микробиологических консорциумов, складывающихся в соответствующих системах. Однозначно связать наличие и количество того или иного ЗОВ в ВГ с конкретным видом МО в сложных многокомпонентных микробиологических сообществах, в которых продукты метаболизма одних МО становятся питательной средой для других, практически невозможно.

Состав микробиоты биоплёнок и бактериопланктона свиных НС имеет определённые различия как в видовом, так и в количественном отношении. Под биоплёнкой понимается совокупность МО, расположенных на поверхности НС, под бактериопланктоном – МО, находящихся в объёме НС. В таблице 1 приведены данные, характеризующие влияние

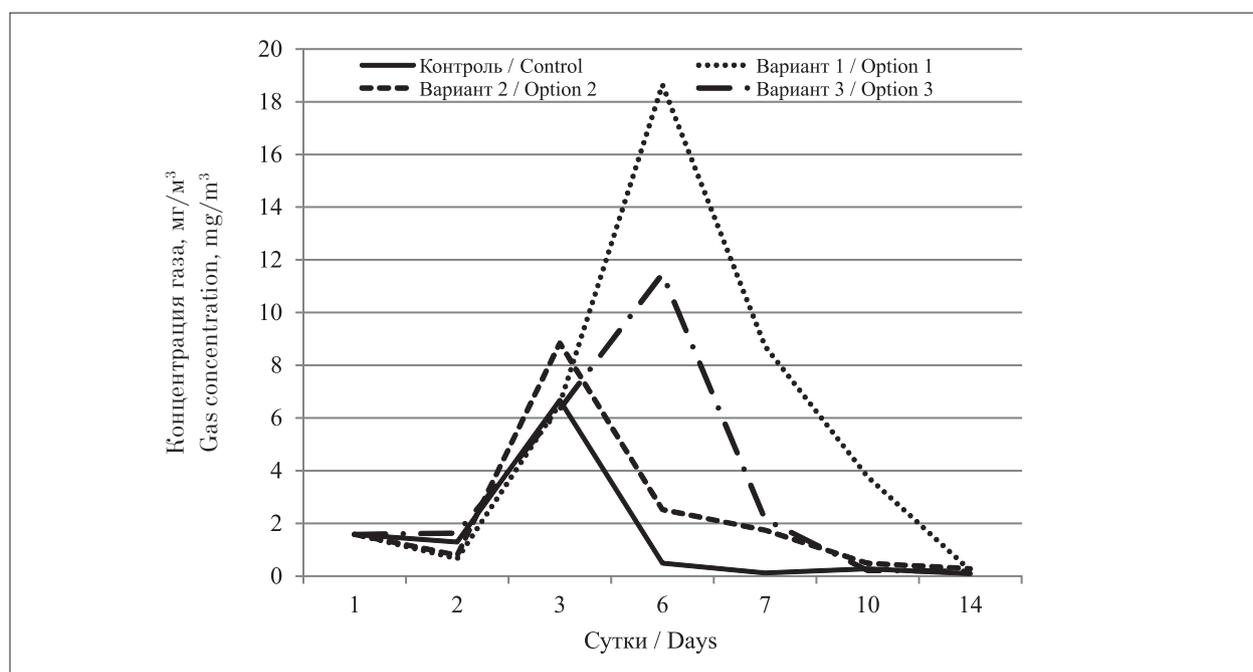


Рис. 4. Динамика выделения H_2S из жидкой фракции навозных стоков
 Fig. 4. Dynamics of H_2S emission from the liquid fraction of manure effluents

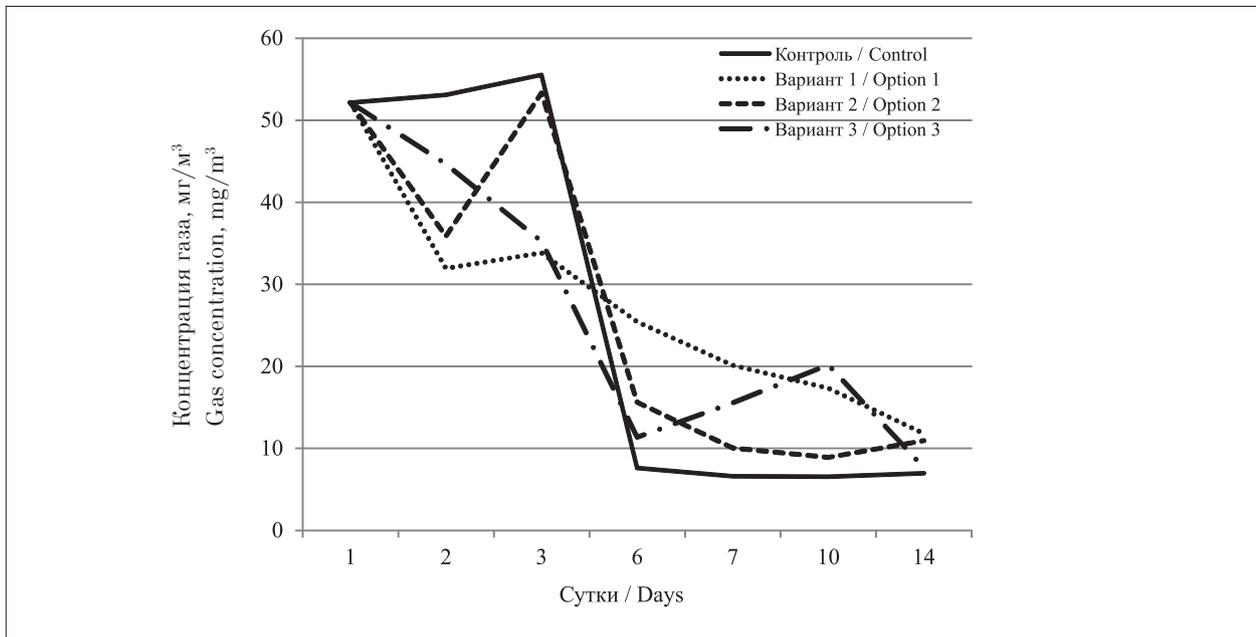


Рис. 5. Динамика выделения R-SH из жидкой фракции навозных стоков
 Fig. 5. Dynamics of R-SH emission from the liquid fraction of manure effluents

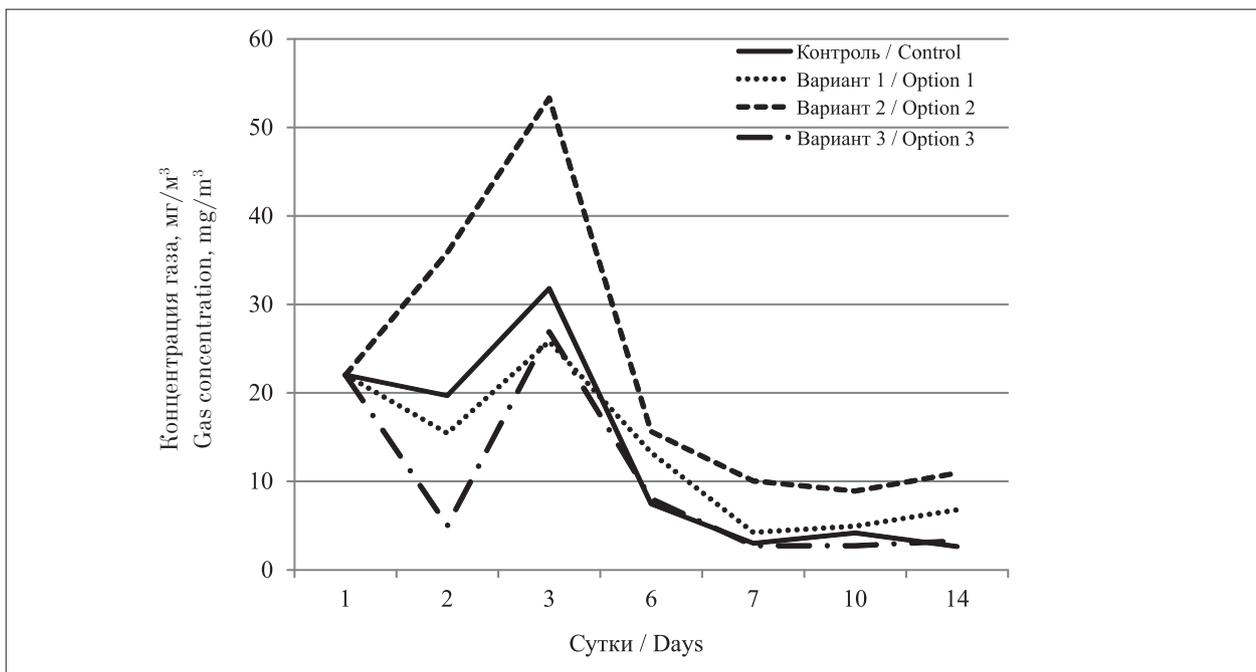


Рис. 6. Динамика выделения C₂H₅SH из жидкой фракции навозных стоков
 Fig. 6. Dynamics of C₂H₅SH emission from the liquid fraction of manure effluents

различных ПАВ на состав микробиоты биоплёнок и бактериопланктона ЖФ.

В результате выполненных исследований установлено, что микробиоценоз биоплёнки ЖФ свиных НС весьма разнообразен и представлен облигатными анаэробными бактериями, грибами, факультативными анаэробными МО и аэробными бактериями (перечислены по мере убывания).

Внесение в ЖФ ПАВ способствовало снижению количества грамотрицательных факультативных анаэробов (*Escherichia coli*, *Proteus* spp.) и грамотрицательных облигатных анаэробов (*Prevotella* sp., *Fusobacterium* sp. и *Bacteroides* sp.) как в биоплёнках, так и в бактериопланктоне. Более выраженного бактерицидного действия КПАВ на грамотрицательные МО выявить не удалось.

Таблица 1 / Table 1
Микробиоценоз ЖФ свиных навозных стоков, КОЕ/мл / Microbiocenosis of the LF of pig manure effluents, CFU/mL

Микроорганизмы Microorganisms	Варианты эксперимента / Options							
	контроль / control		вариант 1 / option 1		вариант 2 / option 2		вариант 3 / option 3	
	БПЛ / BF	БКП / ВР	БПЛ / ВФ	БКП / ВР	БПЛ / ВФ	БКП / ВР	БПЛ / ВФ	БКП / ВР
	Грамотрицательные факультативные анаэробы, КОЕ/мл / Gram-negative facultative anaerobes, CFU/mL							
<i>Escherichia coli</i>	$(4,0 \pm 0,3) \cdot 10^3$	$(5,0 \pm 0,5) \cdot 10^6$	$(6,0 \pm 0,7) \cdot 10^2$	$(8,0 \pm 0,5) \cdot 10^4$	$(5,0 \pm 0,9) \cdot 10^2$	$(7,0 \pm 0,3) \cdot 10^4$	$(6,0 \pm 0,3) \cdot 10^2$	$(8,0 \pm 0,7) \cdot 10^3$
<i>Proteus</i> spp.	$(2,0 \pm 0,3) \cdot 10^3$	$(3,0 \pm 0,4) \cdot 10^6$	$(6,0 \pm 0,5) \cdot 10^2$	$(6,0 \pm 0,8) \cdot 10^5$	$(5,0 \pm 0,3) \cdot 10^2$	$(5,0 \pm 0,2) \cdot 10^4$	$(6,0 \pm 0,3) \cdot 10^2$	$(6,0 \pm 0,5) \cdot 10^4$
<i>Klebsiella</i> sp.	$(4,0 \pm 0,5) \cdot 10^2$	$(4,0 \pm 0,3) \cdot 10^4$	$(5,0 \pm 0,7) \cdot 10^2$	$(6,0 \pm 0,7) \cdot 10^4$	$(4,0 \pm 0,6) \cdot 10^1$	$(8,0 \pm 0,3) \cdot 10^3$	$(5,0 \pm 0,5) \cdot 10^1$	$(7,0 \pm 0,5) \cdot 10^3$
	Грамположительные факультативные анаэробы / Gram-positive facultative anaerobes							
<i>Staphylococcus epidermidis</i>	$(8,0 \pm 0,8) \cdot 10^4$	$(8,0 \pm 0,6) \cdot 10^7$	–	–	–	–	–	–
<i>Lactobacillus</i> spp.	$(2,0 \pm 0,4) \cdot 10^4$	$(5,0 \pm 0,8) \cdot 10^7$	–	$(7,0 \pm 0,5) \cdot 10^7$	–	$(8,0 \pm 0,8) \cdot 10^7$	–	$(7,0 \pm 0,3) \cdot 10^7$
	Грамотрицательные облигатные анаэробы, КОЕ/мл / Gram-negative obligate anaerobes, CFU / mL							
<i>Prevotella</i> sp.	$(6,0 \pm 0,4) \cdot 10^3$	$(5,0 \pm 0,3) \cdot 10^6$	$(8,0 \pm 0,5) \cdot 10^3$	$(7,0 \pm 0,7) \cdot 10^5$	$(7,0 \pm 0,8) \cdot 10^1$	$(6,0 \pm 0,6) \cdot 10^4$	$(7,0 \pm 0,7) \cdot 10^1$	$(6,0 \pm 0,8) \cdot 10^4$
<i>Bacteroides</i> sp.	$(3,0 \pm 0,7) \cdot 10^2$	$(5,0 \pm 1,3) \cdot 10^6$	$(6,0 \pm 0,9) \cdot 10^1$	$(7,0 \pm 0,4) \cdot 10^5$	$(7,0 \pm 0,4) \cdot 10^1$	$(7,0 \pm 0,8) \cdot 10^5$	–	$(6,0 \pm 1,1) \cdot 10^3$
<i>Fusobacterium</i> sp.	$(5,0 \pm 0,9) \cdot 10^2$	$(5,0 \pm 0,9) \cdot 10^5$	$(7,0 \pm 0,4) \cdot 10^2$	$(8,0 \pm 0,4) \cdot 10^4$	$(8,0 \pm 1,1) \cdot 10^2$	$(7,0 \pm 0,4) \cdot 10^4$	$(7,0 \pm 0,5) \cdot 10^2$	$(7,0 \pm 1,3) \cdot 10^4$
	Грамположительные облигатные анаэробы, КОЕ/мл / Gram-positive obligate anaerobes, CFU/mL							
<i>Bifidobacterium</i> spp.	$(4,0 \pm 0,5) \cdot 10^3$	$(5,0 \pm 0,6) \cdot 10^7$	–	$(7,0 \pm 0,4) \cdot 10^6$	–	$(6,0 \pm 0,7) \cdot 10^6$	–	–
<i>Clostridium</i> spp.	$(8,6 \pm 0,4) \cdot 10^5$	$(8,0 \pm 0,6) \cdot 10^7$	$(7,0 \pm 0,8) \cdot 10^5$	$(6,0 \pm 0,9) \cdot 10^7$	$(8,8 \pm 0,6) \cdot 10^5$	$(6,3 \pm 0,7) \cdot 10^7$	$(7,8 \pm 0,3) \cdot 10^5$	$(8,8 \pm 1,4) \cdot 10^7$
<i>Sarcina ventriculi</i>	–	$(4,0 \pm 0,3) \cdot 10^6$	–	$(7,0 \pm 0,4) \cdot 10^5$	–	$(8,0 \pm 0,5) \cdot 10^5$	–	$(6,0 \pm 0,4) \cdot 10^3$
<i>Peptoniphilus asaccharolyticus</i>	–	$(8,0 \pm 1,3) \cdot 10^5$	–	$(6,0 \pm 1,1) \cdot 10^4$	–	$(7,0 \pm 0,8) \cdot 10^2$	–	$(8,0 \pm 1,1) \cdot 10^2$
<i>Anaerococcus prevotii</i>	–	$(5,0 \pm 0,6) \cdot 10^2$	–	$(8,0 \pm 0,3) \cdot 10^2$	–	$(7,0 \pm 0,8) \cdot 10^1$	–	$(8,0 \pm 0,5) \cdot 10^1$
	Грамотрицательные аэробы, КОЕ/мл / Gram-negative aerobes, CFU/mL							
<i>Pseudomonas</i> spp.	$(7,0 \pm 0,7) \cdot 10^2$	$(3,0 \pm 0,9) \cdot 10^3$	$(7,0 \pm 0,4) \cdot 10^1$	$(8,0 \pm 0,5) \cdot 10^3$	$(8,0 \pm 0,4) \cdot 10^1$	$(7,0 \pm 0,4) \cdot 10^3$	–	$(8,0 \pm 1,4) \cdot 10^2$
	Грибы, КОЕ/мл / Fungi, CFU/mL							
<i>Candida</i> sp.	$(5,0 \pm 0,5) \cdot 10^3$	$(6,0 \pm 0,7) \cdot 10^6$	$(7,0 \pm 0,3) \cdot 10^3$	$(7,0 \pm 0,3) \cdot 10^5$	$(7,0 \pm 0,9) \cdot 10^3$	$(6,0 \pm 1,1) \cdot 10^5$	$(5,0 \pm 0,4) \cdot 10^3$	$(7,0 \pm 0,7) \cdot 10^4$
<i>Aspergillus</i> spp.	$(2,0 \pm 1,1) \cdot 10^5$	$(3,0 \pm 0,8) \cdot 10^6$	$(8,0 \pm 0,6) \cdot 10^5$	$(8,0 \pm 0,9) \cdot 10^6$	$(7,0 \pm 0,3) \cdot 10^5$	$(7,0 \pm 0,7) \cdot 10^6$	$(8,0 \pm 0,5) \cdot 10^5$	$(6,0 \pm 0,6) \cdot 10^5$

Примечание: БПЛ – биоплёнка; БКП – бактериопланктон; здесь и далее прочерк обозначает отсутствие вида; жирным ирифтом выделены варианты эксперимента, достоверно ($P > 0,95$) отличающиеся от варианта контроля.

Note: BF – biofilm; BR – bacterioplankton; here and below, a dash denotes the absence of species; the options significantly ($P > 0,95$) differ from the control are highlighted in bold.

Таблица 2 / Table 2

Микробиоценоз биоплёнки ЖФ / Microbiocenosis of LF's biofilm

Микроорганизмы Microorganisms	Варианты эксперимента Options			
	контроль control	вариант 1 option 1	вариант 2 option 2	вариант 3 option 3
Факультативные анаэробы / Facultative anaerobes				
количество, КОЕ/мл / quantity, CFU/mL	$1,1 \cdot 10^5$	$1,7 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^3$
доминирование, % / dominance, %	8,99	0,11	0,07	0,09
В том числе грамотрицательные / Including gram-negative				
количество, КОЕ/мл / quantity, CFU/mL	$6,4 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^3$
доминирование, % / dominance, %	0,54	0,11	0,07	0,09
В том числе грамположительные / Including gram-positive				
количество, КОЕ/мл / quantity, CFU/mL	$1,0 \cdot 10^5$	–		
доминирование, % / dominance, %	8,45			
Облигатные анаэробы / Obligate anaerobes				
количество, КОЕ/мл / quantity, CFU/mL	$8,7 \cdot 10^5$	$7,1 \cdot 10^5$	$7,0 \cdot 10^5$	$7,8 \cdot 10^5$
доминирование, % / dominance, %	73,62	46,71	49,75	49,20
В том числе грамотрицательные / Including gram-negative				
количество, КОЕ/мл / quantity, CFU/mL	$6,8 \cdot 10^3$	$8,8 \cdot 10^3$	$9,4 \cdot 10^2$	$7,7 \cdot 10^2$
доминирование, % / dominance, %	0,58	0,58	0,06	0,05
В том числе грамположительные / Including gram-positive				
количество, КОЕ/мл / quantity, CFU/mL	$8,6 \cdot 10^5$	$7,0 \cdot 10^5$	$8,8 \cdot 10^5$	$7,8 \cdot 10^5$
доминирование, % / dominance, %	73,04	46,13	55,38	49,15
Аэробы / Aerobes				
В том числе грамотрицательные / Including gram-negative				
количество, КОЕ/мл / quantity, CFU/mL	$7,0 \cdot 10^2$	$7,0 \cdot 10^1$	$8,0 \cdot 10^1$	–
доминирование, % / dominance, %	0,06	< 0,01	< 0,01	
Грибы / Fungi				
количество, КОЕ/мл / quantity, CFU/mL	$2,1 \cdot 10^5$	$8,1 \cdot 10^5$	$7,1 \cdot 10^5$	$8,0 \cdot 10^5$
доминирование, % / dominance, %	17,33	53,18	44,49	50,71
Общее число МО / Total number				
количество, КОЕ/мл / quantity, CFU/mL	$1,2 \cdot 10^6$	$1,5 \cdot 10^6$	$1,6 \cdot 10^6$	$1,6 \cdot 10^6$

Такие грамположительные анаэробы, как *Bifidobacterium* spp. и *Lactobacillus* spp., оказались наименее устойчивыми к добавкам ПАВ и к концу эксперимента исчезли из био-плёнок, однако отчасти сохранились в бактериопланктоне, а *Staphylococcus epidermidis* полностью отсутствовал в обработанных НС. Численность *Sarcina ventriculi*, *Peptoniphilus asaccharolyticus*, *Anaerococcus prevotii* в бактериопланктоне экспериментальных вариантов по сравнению с контролем несколько снизилась. Высокую устойчивость к наличию в субстрате ПАВ проявили спорообразующие клостридии (*Clostridium* spp.), вносящие существенный вклад в продуцирование разнообразных ЗОВ.

Количество грибов в био-плёнках под влиянием ПАВ практически не изменилось, однако в бактериопланктоне экспериментальных вариантов наблюдалось некоторое сниже-

ние численности *Candida* sp. по сравнению с контролем. *Aspergillus* spp. проявил высокую толерантность к ПАВ как в био-плёнках, так и в бактериопланктоне.

В таблице 2 приведены данные о доминирующих группах МО, представленных в био-плёнках контрольного и экспериментальных вариантов ЖФ.

В контрольных образцах био-плёнок (табл. 1 и 2) доминировали грамположительные облигатные анаэробы, представленные *Clostridium* spp. и *Bifidobacterium* spp., их числовое значение равнялось $8,6 \cdot 10^5$ КОЕ/мл, что составляло 73,04% от общего числа МО НС. Следует отметить, что в био-плёнках всех исследуемых образцов преобладали грамположительные облигатные анаэробы, однако в опытных вариантах 1, 2 и 3 они были представлены исключительно бактериями рода *Clostridium* (*C. putrificum*, *C. perfringens*, *C. sporogenes*,

C. bifermentans, *C. septicum*, *C. difficile*). Количество клостридий варьировало в этих вариантах от $7,0$ до $8,8 \cdot 10^5$ КОЕ/мл, что соответствовало диапазону относительных значений от 46,13 до 55,38%. Возможно, это связано с тем, что при наступлении неблагоприятных для жизнедеятельности клостридий условий они способны к спорообразованию; данное свойство позволяет клостридиям проявлять повышенную устойчивость к действию неблагоприятных факторов, в том числе воздействию сурфактантов.

Факультативные анаэробные МО биоплёнок контроля представлены грамположительными бактериями *Staphylococcus epidermidis* и *Lactobacillus* ssp. ($1,0 \cdot 10^5$ КОЕ/мл), что составляет 8,45% от общего числа МО НС. Использование ПАВ привело к их полному исчезновению в биоплёнках.

Применение сурфактантов повлияло на видовое разнообразие и количество грамотрицательных облигатных анаэробов. Их общее число в биоплёнках достоверно снизилось при использовании НПАВ до $9,4 \cdot 10^2$ КОЕ/мл и АПАВ до $7,7 \cdot 10^2$ КОЕ/мл по сравнению с контролем $6,8 \cdot 10^3$ КОЕ/мл. Применение АПАВ привело к полному исчезновению в биоплёнках *Bacteroides* sp. (*B. ovatus*, *B. vulgatus*, *B. fragilis*), а использование КПАВ и НПАВ достоверно снизило их количество. Концентрация *Prevotella* sp. (*P. buccalis*, *P. intermedia*, *P. bivia*, *P. melaninogenica*, *P. oralis*) достоверно уменьшилась при применении НПАВ и АПАВ. Количество *Fusobacterium* sp. (*F. nucleatum*, *F. necrophorum* и *F. varium*) в биоплёнках достоверно не изменилось.

Грамотрицательные факультативные анаэробы в контроле биоплёнок, представленные бактериями рода *Escherichia* (*E. coli*, *E. blattae*, *E. coli inactive*, *E. fergusonii*, *E. hermannii*, *E. vulneris*), *Proteus* ssp. (*P. vulgaris*) и *Klebsiella* sp. составили $6,4 \cdot 10^3$ КОЕ/мл (0,54% от общего числа МО НС). ПАВ достоверно снизили количество колиформных бактерий и *Proteus vulgaris* в вариантах 1, 2 и 3. *Klebsiella* sp. оказалась чувствительна к НПАВ и АПАВ.

Количество грибов в биоплёнках контрольных образцов было $2,1 \cdot 10^5$ КОЕ/мл (17,33% от общего числа МО НС). Добавление ПАВ привело к незначительному увеличению количества *Candida* sp. и *Aspergillus* ssp. (изменения недостоверны, за исключением АПАВ) во всех опытных образцах ($(7,1-8,1) \cdot 10^5$ КОЕ/мл). Интересно, что использование ПАВ снизило абсолютное количе-

ство грибов, но увеличило их доминирование в микробиоценозе НС (44,49–53,18%). Наиболее эффективным оказался НПАВ.

Аэробные МО контрольного образца биоплёнки были представлены *Pseudomonas* spp. $7,0 \cdot 10^2$ КОЕ/мл, что составляло 0,1% от общего числа МО НС. Применение АПАВ привело к исчезновению МО, а КПАВ и НПАВ достоверно снизили концентрацию грамотрицательных бактерий.

В таблице 3 представлен микробиоценоз бактериопланктона и данные о доминирующих группах МО в ЖФ.

Микробиоценоз бактериопланктона (табл. 1 и 3) ЖФ свинных НС представлен облигатными и факультативными анаэробами, грибами и аэробными МО (расположены в порядке убывания). Следует отметить, что в бактериопланктоне, также, как и в биоплёнке преобладают грамположительные МО.

Грамположительные облигатные анаэробы $1,4 \cdot 10^8$ КОЕ/мл составляют 46,11% от общего числа МО бактериопланктона контроля. Отмечено микробное разнообразие данной группы МО: так, кроме упоминаемых ранее *Clostridium* ssp. и *Bifidobacterium* ssp., обнаружены *Sarcina ventriculi*, *Peptoniphilus asaccharolyticus* и *Anaerococcus prevotii*. Добавки ПАВ достоверно снизили количество *Sarcina ventriculi* и *Peptoniphilus asaccharolyticus*, причем наиболее эффективно в отношении *S. ventriculi* сработали АПАВ, а в отношении *P. asaccharolyticus* – НПАВ и АПАВ. *Clostridium* ssp. также оказались не чувствительны к ПАВ и в бактериопланктоне.

Грамположительные факультативные анаэробы *Staphylococcus epidermidis* и *Lactobacillus* ssp. численно составляющие $1,3 \cdot 10^8$ КОЕ/мл (44,47% от общего числа МО) в контроле, в вариантах 1, 2 и 3 были представлены исключительно *Lactobacillus* ssp.

Микробное разнообразие грамотрицательных облигатных анаэробных МО было аналогично таковому в биоплёнках и представлено *Prevotella* sp., *Fusobacterium* sp. и *Bacteroides* sp. Их абсолютное количество достигло $1,1 \cdot 10^7$ КОЕ/мл (3,59% от общего числа МО) в контроле. Применение ПАВ достоверно снизило количество указанных МО (за исключением *Fusobacterium* sp. при использовании КПАВ), наиболее эффективен при использовании оказался АПАВ.

Среди факультативных анаэробов в бактериопланктоне контроля доминировали грамотрицательные МО *Escherichia coli*, *Proteus* spp. и *Klebsiella* sp., численность

Таблица 3 / Table 3

Микробиоценоз бактериопланктона ЖФ / Microbiocenosis of LF's bacterioplankton

Микроорганизмы Microorganisms	Варианты эксперимента / Options			
	контроль control	вариант 1 option 1	вариант 2 option 2	вариант 3 option 3
Факультативные анаэробы / Facultative anaerobes				
количество, КОЕ/мл / quantity, CFU/mL	1,4 · 10 ⁸	7,1 · 10 ⁷	8,0 · 10 ⁷	7,0 · 10 ⁷
доминирование, % / dominance, %	47,22	48,05	50,60	44,10
В том числе грамотрицательные / Including gram-negative				
количество, КОЕ/мл / quantity, CFU/mL	8,0 · 10 ⁶	7,4 · 10 ⁵	1,3 · 10 ⁵	7,5 · 10 ⁴
доминирование, % / dominance, %	2,75	0,50	0,08	0,05
В том числе грамположительные / Including gram-positive				
количество, КОЕ/мл / quantity, CFU/mL	1,3 · 10 ⁸	7,0 · 10 ⁷	8,0 · 10 ⁷	7,0 · 10 ⁷
доминирование, % / dominance, %	44,47	47,55	50,52	44,05
Облигатные анаэробы / Obligate anaerobes				
количество, КОЕ/мл / quantity, CFU/mL	1,5 · 10 ⁸	6,9 · 10 ⁷	7,1 · 10 ⁷	8,8 · 10 ⁷
доминирование, % / dominance, %	49,70	46,04	44,60	55,48
В том числе грамотрицательные / Including gram-negative				
количество, КОЕ/мл / quantity, CFU/mL	1,1 · 10 ⁷	1,5 · 10 ⁶	8,3 · 10 ⁵	1,4 · 10 ⁵
доминирование, % / dominance, %	3,59	1,00	0,52	0,09
В том числе грамположительные / Including gram-positive				
количество, КОЕ/мл / quantity, CFU/mL	1,4 · 10 ⁸	6,8 · 10 ⁷	7,0 · 10 ⁷	8,8 · 10 ⁷
доминирование, % / dominance, %	46,11	45,04	44,08	55,39
Аэробы / Aerobes				
В том числе грамотрицательные / Including gram-negative				
количество, КОЕ/мл / quantity, CFU/mL	3,0 · 10 ³	8,0 · 10 ³	7,0 · 10 ³	8,0 · 10 ²
доминирование, % / dominance, %	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Грибы / Fungi				
количество, КОЕ/мл / quantity, CFU/mL	9,0 · 10 ⁶	8,7 · 10 ⁶	7,6 · 10 ⁶	6,7 · 10 ⁵
доминирование, % / dominance, %	3,08	5,91	4,80	0,42
Общее число МО / Total number				
количество, КОЕ/мл / quantity, CFU/mL	2,9 · 10 ⁸	1,5 · 10 ⁸	1,6 · 10 ⁸	1,6 · 10 ⁸

составила $8,0 \cdot 10^6$ КОЕ/мл (2,75% от общего числа МО). Добавление ПАВ достоверно снизило их количество, однако уровень *Klebsiella* sp. при использовании КПАВ не достоверно возрос.

Грибы в микробном сообществе бактериопланктона контроля составляли $9,0 \cdot 10^6$ КОЕ/мл (3,08% от общего числа МО) и были представлены *Candida* sp. и *Aspergillus* spp. Наиболее эффективным оказался АПАВ, использование КПАВ и НПАВ привело к доминированию грибов (5,91 и 4,80% соответственно). Абсолютное количество *Candida* sp. достоверно снижалось при использовании всех типов ПАВ.

Аэробы *Pseudomonas* spp. в пробах бактериопланктона находились в ничтожно малых количествах (менее 0,01%), применение АПАВ оказалось наиболее эффективным препаратом для снижения их численности.

Заклучение

Выполненные исследования показали, что даже небольшие добавки ПАВ (0,01 г/л) могут оказать существенное влияние на эмиссию парниковых газов, запахообразующих веществ и микробиоту навозных стоков. Положительное влияние на эмиссию CH_4 оказало внесение в ЖФ КПАВ. Можно предположить, что данный эффект обусловлен спецификой воздействия КПАВ на цитоплазматические мембраны разных групп МО, а именно повышением проницаемости мембран метаногенных архей, в результате которого активируется их метаболизм, и разрушением мембран эукарит, вызывающим гибель повреждённых клеток. Снижение конкуренции со стороны эукариот обеспечивает некоторые преимущества метаногенным археям.

Добавка различных типов ПАВ не приводит к подавлению выделения запахообра-

зующих веществ, однако период активной эмиссии меркаптанов становится более продолжительным. В варианте эксперимента с добавкой НПАВ в ВГ выявлено наиболее высокое содержание этилмеркаптана. Вероятно, данный эффект обусловлен формированием более плотных и устойчивых биоплёнок на границе ЖФ/воздух, изолирующих бактериопланктон от воздействия O_2 , что обеспечивает оптимальные условия для анаэробных процессов аммонификации, сопровождающихся образованием соответствующего ЗОВ. Существенных различий в воздействии низких концентраций различных типов ПАВ на микробиоту ЖФ выявлено не было, однако по комплексу показателей добавка АПАВ оказывает более выраженное бактериостатическое влияние на микробиоту и эмиссию ЗОВ, чем остальные ПАВ.

В биоплёнках и бактериопланктоне всех вариантов эксперимента доминировали различные представители рода *Clostridium* ssp. – грамположительные облигатные анаэробы. На втором месте по численности в биоплёнках находились грибы. За счёт спорообразования для клостридий характерна высокая устойчивость к воздействию различных неблагоприятных факторов внешней среды, включая воздействие химических веществ. Соответствующие МО вносят основной вклад в процессы аммонификации биогенных отходов, сопровождающиеся выделением ЗОВ. Подавление численности клостридий, а, следовательно, ограничение эмиссии ЗОВ за счёт обработки НС относительно безопасными для окружающей среды веществами, представляет большую проблему.

Литература

1. Авроров В.А., Лузгин Г.Д., Авроров Г.В., Польдяева М.А. О новой энергосберегающей технологии приготовления корма для животных, птиц и рыб // XXI век: Итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2016. № 1 (29). С. 75–78.
2. Романовская А.А. Эмиссия закиси азота в животноводстве Российской Федерации в 1990–2004 годах // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2007. № 5. С. 42–44.
3. Сырчина Н.В., Пилип Л.В., Ашихмина Т.Я. Контроль запахового загрязнения атмосферного воздуха (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 2. С. 26–34.
4. Сырчина Н.В., Кантор Г.Я., Пугач В.Н., Ашихмина Т.Я. Вклад углекислого газа и воды в парниковый эффект // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 4. С. 218–223.

5. Колеватых Е.П., Пилип Л.В., Сырчина Н.В., Козловин В.А., Ашихмина Т.Я. Трансформация микробиоты отходов животноводства под влиянием химических реагентов для устранения запаха // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 4. С. 159–165.
6. Сырчина Н.В., Пилип Л.В., Колеватых Е.П., Ашихмина Т.Я., Кузнецов Д.А. Влияние гипохлорита натрия на микробиоту и запах навозных стоков // Поволжский экологический журнал. 2023. № 1. С. 107–116.
7. Николаенко Н.Н., Аржаков В.Н., Аржаков П.В., Копылов Г.М., Кулинич Е.Н. Спороцидное действие нового полифункционального биоцидного препарата // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 2. С. 447–451.
8. Шаймухаметов М.А., Иванов А.И., Струнин Б.П., Кильметова И.Р. Применение дезинфицирующего средства роксацин в телятниках, неблагополучных по эшерихиозу // Ветеринария Кубани. 2015. № 5. С. 25–26.
9. Glover R.E., Smith R.R., Jones M.V., Jackson S.K., Rowlands C.C. An EPR investigation of surfactant action on bacterial membranes // FEMS Microbiology Letters. 1999. V. 177. No. 1. P. 57–62.
10. Murguía M.C., Cristaldi M.D., Porto A., Conza J.D., Grau R. Synthesis, surface-active properties, and antimicrobial activities of new neutral and cationic trimeric surfactants // Journal of Surfactants and Detergents. 2008. V. 11. P. 41–48.
11. Trejos-Delgado C., Cadavid-Restrepo G.E., Hormaza-Anaguano A., Agudelo E.A., Barrios-Ziolo L., Loaiza-Usuga J.C., Cardona-Gallo S.A. Oil bioremediation in a tropical contaminated soil using a reactor // Anais da Academia Brasileira de Ciências. 2020. V. 92. No. 2. P. 20181–20201.
12. Lladó S., Covino S., Solanas A.M., Viñas M., Petruccioli M., D'annibale A. Comparative assessment of bioremediation approaches to highly recalcitrant PAH degradation in a real industrial polluted soil // Journal of Hazardous Materials. 2013. V. 248. P. 407–414.
13. Muthukumar N., Maruthamuthu S., Palaniswamy N. Role of cationic and nonionic surfactants on biocidal efficiency in diesel-water interface // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. 2007. V. 57. No. 2. P. 152–160.
14. Treter J., Bonatto F., Krug C., Soares G.V., Baumvol I.J.R., Macedo A.J. Washing-resistant surfactant coated surface is able to inhibit pathogenic bacteria adhesion // Applied Surface Science. 2014. V. 303. P. 147–154.
15. André V. Effect of sodium lauryl sulfate (SLS) applied as a patch on human skin physiology and its microbiota // Cosmetics. 2021. V. 8. No. 1. Article No. 6.
16. García-Morales J.L., Nebot E., Romero L.I., Sales D. Comparison between acidogenic and methanogenic inhibition caused by linear alkylbenzene-sulfonate (LAS) // Chemical and Biochemical Engineering Quarterly. 2001. V. 15. No. 1. P. 13–19.
17. Палий А.П., Палий А.П., Родионова Е.А. Дезинфицирующие средства в системе противозэпи-

зоотических мероприятий // Известия Великолукской государственной сельскохозяйственной академии. 2017. № 2. С. 24–33.

18. Carmona-Ribeiro A.M., de Melo Carrasco L.D. Cationic antimicrobial polymers and their assemblies // International Journal of Molecular Sciences. 2013. V. 14. No. 5. P. 9906–9946.

19. Robinson V.C. Final report of the amended safety assessment of sodium laureth sulfate and related salts of sulfated ethoxylated alcohols // International Journal of Toxicology. 2010. V. 29. No. 4. P. 151–161.

20. Wang J., Xue J., Dong X., Yu Q., Baker S.N., Wang M., Huang H. Antimicrobial properties of benzalkonium chloride derived polymerizable deep eutectic solvent // International Journal of Pharmaceutics. 2020. V. 575. P. 119005–119021.

21. Singh S.K., Bajpai M., Tyagi V.K. Amine oxides: a review // Journal of Oleo Science. 2006. V. 55. No. 3. P. 99–119.

22. Fernández-Serrano M., Jurado E., Fernández-Arteaga A., Ríos F., Lechuga M. Ecotoxicological assessment of mixtures of ether carboxylic derivative and amine-oxide-based non-ionic surfactants on the aquatic environment // Journal of Surfactants and Detergents. 2014. V. 17. No. 6. P. 1161–1168.

23. Thauer R.K., Kaster A.K., Seedorf H., Buckel W., Hedderich R. Methanogenic archaea: ecologically relevant differences in energy conservation // Nature Reviews Microbiology. 2008. V. 6. No. 8. P. 579–591.

24. Zhu X., Campanaro S., Treu L., Seshadri R., Ivanova N., Kougias P.G., Kyrpides N., Angelidaki I. Metabolic dependencies govern microbial syntrophies during methanogenesis in an anaerobic digestion ecosystem // Microbiome. 2020. V. 8. No. 1. Article No. 22.

25. Gould S.B. Membranes and evolution // Current Biology. 2018. V. 28. No. 8. P. 381–385.

26. Mayer F., Enzmann F., Lopez A.M., Holtmann D. Performance of different methanogenic species for the microbial electrosynthesis of methane from carbon dioxide // Bioresource Technology. 2019. V. 289. Article No. 121706.

27. Kermani M., Bina B., Movahedian H., Amin M.M., Nikaein M. Application of moving bed biofilm process for biological organics and nutrients removal from municipal wastewater // American Journal of Environmental Sciences. 2008. V. 4. No. 6. P. 675–689.

28. Чиркин А.А. Фотосинтез // Хімія: проблеми викладання. 2006. № 12. С. 3–12.

References

1. Avrorov V.A., Luzgin G.D., Avrorov G.V., Poldyaeva M.A. About the new energy-saving technology of food preparation for animals, birds and fish // XXI century: Resumes of the Past and Challenges of the Present plus. 2016. No. 1 (29). P. 75–78 (in Russian).

2. Romanovskaya A.A. Nitrous oxide emissions from livestock farming in the Russian Federation in 1990–2004 // Doklady Rossiyskoy akademii selskokhozyaystvennykh nauk. 2007. No. 5. P. 42–44 (in Russian).

3. Syrchina N.V., Pilip L.V., Ashikhmina T.Ya. Control of odor pollution of atmospheric air (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 2. P. 26–34 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-026-034

4. Syrchina N.V., Kantor G. YA., Pugach V.N., Ashikhmina T.Ya. Contribution of carbon dioxide and water to the greenhouse effect // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 4. P. 218–223 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-4-218-223

5. Kolevatykh E.P., Pilip L.V., Syrchina N.V., Kozvonin V.A., Ashikhmina T.Ya. Transformation of the microbiota of animal husbandry waste under the influence of chemical reagents to eliminate odor // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 4. P. 159–165 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-159-165

6. Syrchina N.V., Pilip L.V., Kolevatykh E.P., Ashikhmina T.Ya., Kuznetsov D.A. Effect of sodium hypochlorite on the microbiota and odor of manure effluents // Povolzhskiy Journal of Ecology. 2023. No. 1. P. 107–116 (in Russian). doi: 10.35885/1684-7318-2023-1-107-116

7. Nikolaenko N.N., Arzhakov V.N., Arzhakov P.V., Kopylov G.M., Kulinich E.N. Sporocidal effects of the preparation of a new multifunctional biocide // Modern problems of Science and Education. 2012. No. 2. P. 447–451 (in Russian).

8. Shaymukhametov M.A., Ivanov A.I., Strunin B.P., Kilmetova I.R. Use of Roxacyn disinfectant in calf-shed with escherichiosis // Veterinariya Kubani. 2015. No. 5. P. 25–26 (in Russian).

9. Glover R.E., Smith R.R., Jones M.V., Jackson S.K., Rowlands C.C. An EPR investigation of surfactant action on bacterial membranes // FEMS Microbiology Letters. 1999. V. 177. No. 1. P. 57–62. doi: 10.1111/j.1574-6968.1999.tb13713.x

10. Murguía M.C., Cristaldi M.D., Porto A., Conza J.D., Grau R. Synthesis, surface-active properties, and antimicrobial activities of new neutral and cationic trimeric surfactants // Journal of Surfactants and Detergents. 2008. V. 11. P. 41–48. doi: 10.1007/s11743-007-1052-4

11. Trejos-Delgado C., Cadavid-Restrepo G.E., Hormaza-Anaguano A., Agudelo E.A., Barrios-Ziolo L., Loaiza-Usuga J.C., Cardona-Gallo S.A. Oil bioremediation in a tropical contaminated soil using a reactor // Anais da Academia Brasileira de Ciências. 2020. V. 92. No. 2. P. 20181–20201. doi: 10.1590/0001-3765202020181396

12. Lladó S., Covino S., Solanas A.M., Viñas M., Petruccioli M., D'annibale A. Comparative assessment of bioremediation approaches to highly recalcitrant PAH degradation in a real industrial polluted soil // Journal of Hazardous Materials. 2013. V. 248–249. P. 407–414. doi: 10.1016/j.jhazmat.2013.01.020

13. Muthukumar N., Maruthamuthu S., Palaniswamy N. Role of cationic and nonionic surfactants on biocidal efficiency in diesel-water interface // *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2007. V. 57. No. 2. P. 152–160. doi: 10.1016/j.colsurfb.2007.01.019
14. Treter J., Bonatto F., Krug C., Soares G.V., Baumvol I.J.R., Macedo A.J. Washing-resistant surfactant coated surface is able to inhibit pathogenic bacteria adhesion // *Applied Surface Science*. 2014. V. 303. P. 147–154. doi: 10.1016/j.apsusc.2014.02.123
15. Leoty-Okombi S., Gillaizeau F., Leuillet S., Douillard B., Le Fresne-Languille S., Carton T., De Martino A., Moussou P., Bonnaud-Rosaye C., André V. Effect of sodium lauryl sulfate (SLS) applied as a patch on human skin physiology and its microbiota // *Cosmetics*. 2021. V. 8. No. 1. Article No. 6. doi: 10.3390/cosmetics8010006
16. García-Morales J.L., Nebot-Sanz E., Romero García L.I., Sales D. Comparison between acidogenic and methanogenic inhibition caused by linear alkylbenzene-sulfonate (LAS) // *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*. 2001. V. 15. No. 1. P. 13–19.
17. Paliy A.P., Paliy A.P., Rodionova E.A. Disinfectants in the system of antiepidemiological measures // *Izvestiya velikolukskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*. 2017. No. 2. P. 24–33 (in Russian).
18. Carmona-Ribeiro A.M., De Melo Carrasco L.D. Cationic antimicrobial polymers and their assemblies // *International Journal of Molecular Sciences*. 2013. V. 14. No. 5. P. 9906–9946. doi: 10.3390/ijms14059906
19. Robinson V.C., Bergfeld W.F., Belsito D.V., Hill R.A., Klaassen C.D., Marks J.G.Jr., Shank R.C., Slaga T.J., Snyder P.W., Alan Andersen F. Final report of the amended safety assessment of sodium laureth sulfate and related salts of sulfated ethoxylated alcohols // *International Journal of Toxicology*. 2010. V. 29. No. 4. P. 151–161. doi: 10.1177/1091584810373151
20. Wang J., Xue J., Dong X., Yu Q., Baker S.N., Wang M., Huang H. Antimicrobial properties of benzalkonium chloride derived polymerizable deep eutectic solvent // *International Journal of Pharmaceutics*. 2020. V. 575. P. 119005–119021. doi: 10.1016/j.ijpharm.2019.119005
21. Singh S.K., Bajpai M., Tyagi V.K. Amine oxides: a review // *Journal of Oleo Science*. 2006. V. 55. No. 3. P. 99–119. doi: 10.5650/jos.55.99
22. Fernández-Serrano M., Jurado E., Fernández-Arteaga A., Ríos F., Lechuga M. Ecotoxicological assessment of mixtures of ether carboxylic derivative and amine-oxide-based non-ionic surfactants on the aquatic environment // *Journal of Surfactants and Detergents*. 2014. V. 17. No. 6. P. 1161–1168. doi: 10.1007/s11743-014-1621-2
23. Thauer R.K., Kaster A.K., Seedorf H., Buckel W., Hedderich R. Methanogenic archaea: ecologically relevant differences in energy conservation // *Nature Reviews Microbiology*. 2008. V. 6. No. 8. P. 579–591. doi: 10.1038/nrmicro1931
24. Zhu X., Campanaro S., Treu L., Seshadri R., Ivanova N., Kougias P.G., Kyrpidis N., Angelidaki I. Metabolic dependencies govern microbial syntrophies during methanogenesis in an anaerobic digestion ecosystem // *Microbiome*. 2020. V. 8. No. 1. Article No. 22. doi: 10.1186/s40168-019-0780-9
25. Gould S.B. Membranes and evolution // *Current Biology*. 2018. V. 28. No. 8. P. 381–385. doi: 10.1016/j.cub.2018.01.086
26. Mayer F., Enzmann F., Lopez A.M., Holtmann D. Performance of different methanogenic species for the microbial electrosynthesis of methane from carbon dioxide // *Bioresource Technology*. 2019. V. 289. Article No. 121706. doi: 10.1016/j.biortech.2019.121706
27. Kermani M., Bina B., Movahedian H., Amin M.M., Nikaein M. Application of moving bed biofilm process for biological organics and nutrients removal from municipal wastewater // *American Journal of Environmental Sciences*. 2008. V. 4. No. 6. P. 675–682. doi: 10.3844/ajessp.2008.675.682
28. Chirkin A.A. Photosynthesis // *Khimiya: problemy vykladannya*. 2006. No. 12. P. 3–12 (in Russian).

**Мониторинг распространения *Heracleum sosnowskyi*
на урбанизированных территориях по данным дистанционного
зондирования Земли**

© 2023. Т. Я. Ашихмина^{1,2}, д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,
В. В. Рутман¹, м. н. с., Т. А. Адамович¹, к. г. н., доцент,
Е. В. Товстик¹, к. б. н., доцент, с. н. с.,
¹Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
²Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: usr08619@vyatsu.ru

В статье рассматривается проблема распространения и возможности мониторинга борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) на отдельных территориях городской среды с помощью данных дистанционного зондирования Земли. В качестве исходной спутниковой информации использовались снимки с аппарата Sentinel-2 с разрешением 10 м. По спутниковым данным осуществляли распознавание, отслеживание, анализ и картирование участков распространения борщевика Сосновского. Выбор участков массового роста борщевика Сосновского для мониторинга проводился в ходе предварительных полевых исследований на примере территории г. Кирова. В основе результатов мониторинговых исследований лежали различия в отражающей способности между борщевиком и другими объектами окружающей среды. Обработку данных спутниковой информации проводили в программе QGIS-3.26. По результатам работы были получены карты, на которых визуализировались участки массового роста борщевика Сосновского. Встроенные инструменты программы позволили вычислить площади распространения исследуемого инвазивного вида на отдельных территориальных участках г. Кирова. Идентифицированные зоны были представлены участками сплошного зарастания и распределения его небольшими группами. В работе описана методика, позволяющая рассчитать изменения площадей участков сплошного зарастания борщевиком Сосновского на исследуемой территории. Методика позволяет установить периоды максимального прироста борщевика, определять тенденции изменения площадей участков его сплошного зарастания.

Результаты работы наглядно демонстрируют эффективность сочетания методов дистанционного зондирования Земли и алгоритмов обработки космоснимков в мониторинге распространения борщевика Сосновского.

Ключевые слова: *Heracleum sosnowskyi*, инвазивные виды, мониторинг, дистанционное зондирование Земли, Sentinel-2, алгоритм обработки, площадь зарастания.

**Monitoring the distribution of *Heracleum sosnowskyi*
in urban areas based on Earth remote sensing data**

© 2023. T. Ya. Ashikhmina^{1,2} ORCID: 0000-0003-4919-0047, V. V. Rutman¹ ORCID: 0000-0002-9025-3487,
T. A. Adamovich¹ ORCID: 0000-0002-8684-927X, E. V. Tovstik¹ ORCID: 0000-0003-1861-6076,
¹Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
²Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: usr08619@vyatsu.ru

The article deals with the problem of distribution and the possibility of monitoring Sosnowsky's hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) in certain areas of the urban environment using Earth remote sensing data. The Sentinel-2 images with a resolution of 10 m were used as the initial satellite information. Identifying, tracking, analysis and mapping the distribution areas of Sosnowsky's hogweed were carried out using satellite data. The choice of mass growing areas of Sosnowsky's hogweed for monitoring was carried out during the preliminary field studies of the urban territory

of Kirov. The monitoring studies were based on differences in the reflectivity between the hogweed and other environmental objects. Satellite data processing was carried out using the QGIS-3.26 program. Based on the results of the work, maps were obtained, on which areas of mass growth of Sosnowsky's hogweed were visualized. The built-in tools of the program allowed calculating the area of distribution of the studied invasive species in certain areas of Kirov. The identified areas were represented by plots of continuous overgrowth and its distribution in small groups. The paper describes a technique that makes it possible to calculate changes in the areas of plots of continuous overgrowth of Sosnowsky's hogweed in the study area. The technique enables to identify periods of maximum growth of hogweed, to determine the trends in the area of its continuous overgrowth.

The results of the work demonstrate the effectiveness of a combination of Earth remote sensing methods and satellite image processing algorithms in monitoring the distribution of Sosnowsky's hogweed.

Keywords: *Heracleum sosnowskyi*, invasive species, monitoring, Earth remote sensing, Sentinel-2, processing algorithm, overgrowth area.

Инвазия растений, оказывая трансформирующее воздействие на биоразнообразие и устойчивость естественных экосистем, выступает серьёзной эколого-экономической проблемой [1–3]. Она заслуживает особого внимания, так как в современных условиях изменяющегося климата высока вероятность распространения нежелательных видов [4].

В настоящее время в некоторых странах на законодательном уровне принимаются меры по недопущению интродукции определённых видов растений [5], разрабатываются способы борьбы с ними [6].

Важным инструментом противодействия биологическим инвазиям являются методы мониторинга, с помощью которых предоставляется возможность определять приоритетные участки распространения инвазивных видов растений, оценить их обилие [7]. Учитывая сложность искоренения чужеродных видов, особенно актуально проводить мониторинг на ранней стадии инвазии.

Своевременному обнаружению появления инвазивных видов помогают новые технологии. Среди них ДНК-экспертиза, рецепторные (хеморецепция), аэрокосмические технологии и др. [8].

Наряду с полевыми обследованиями и лабораторным анализом, дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) является значимым инструментом мониторинга растительных видов. Широкий спектр изображений от различных оптических датчиков (мультиспектральные, гиперспектральные) позволяет получать полезную информацию для картографирования их пространственного распределения [9–12]. Наряду с этим, данные космической съёмки являются объективными, они охватывают значительные площади, имеют относительно низкую стоимость по сравнению с другими методами [13–16].

Изучение спектрального отклика растений на основе данных, собранных с помощью ДЗЗ, имеет большой потенциал для идентификации

инвазивных растений [17]. Однако точность их определения зависит от многих факторов, в том числе метода обработки данных, типа растительности. Например, надёжность распознавания борщевика Сосновского на фоне других травянистых и древесных растений по снимкам WorldView-3 методом неконтролируемой классификации программой MultiSpec в работе [18] достигала 83%. Аналогичная точность определения борщевика Сосновского по спектральным признакам отмечена в работах и других авторов. При этом более высокой точности позволяет достичь метод классификации на основе нейронных сетей [19].

Значительные успехи в повышении точности обнаружения борщевика Сосновского на снимках достигнуты при комбинировании методов ДЗЗ и машинного обучения. Так, неконтролируемая классификация программой **RGB-изображения на основе контролируемого метода расчёта средней длины волны** в отдельных каналах спектра отражения борщевика Сосновского [20]. Известны алгоритмы обучения на наборе данных, состоящем из 12 каналов спутниковых снимков Sentinel-2, цифровой модели рельефа и некоторых спектральных индексов, которые используются в алгоритме в качестве параметров. Перспективность подхода заключается в выявлении биофизических параметров борщевика Сосновского по его коэффициентам отражения с уточнением спектральной модели непосредственно по набору данных [21]. К наиболее популярным спектральным индексам, используемым для выявления ареалов борщевика Сосновского, относятся NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) и ClGreen (Green Chlorophyll Index) [22]. Кроме того, разработан новый спектральный индекс борщевика Сосновского – *Heracleum Sosnowskyi Index (HSI)* [23]. В целом разработка системы мониторинга борщевика Сосновского по данным дистанционного зондирования Земли не оста-

навликает своего развития и направлена на увеличение точности его обнаружения.

Цель работы – разработка методики обнаружения участков распространения борщевика Сосновского на примере отдельных территорий городской среды по данным дистанционного зондирования Земли.

Материалы и методы исследования

Алгоритм обработки полученных спутниковых изображений включал в себя два основных этапа: подготовительный полевой и камеральный. На начальном этапе производили сбор информации на местности в ходе маршрутной съёмки. На камеральном этапе осуществляли поиск и обработку космических снимков исследуемой территории,

а также интерпретировали и корректировали данные. Далее создавали цифровые карты и производили на их основе расчёт площадей распространения борщевика Сосновского на отдельных территориях г. Кирова (рис. 1).

В качестве исходной спутниковой информации для обработки в различных программных продуктах наиболее часто используются снимки с таких космических аппаратов, как LandSat-8, Sentinel-2 и RapidEye. В данной работе для изучения ареалов распространения борщевика Сосновского использовали снимки со спутника Sentinel-2 с разрешением 10 м.

В качестве исследуемой территории был выбран участок массового зарастания борщевиком Сосновского площадью 10 км². Участок находился в южной части г. Кирова,

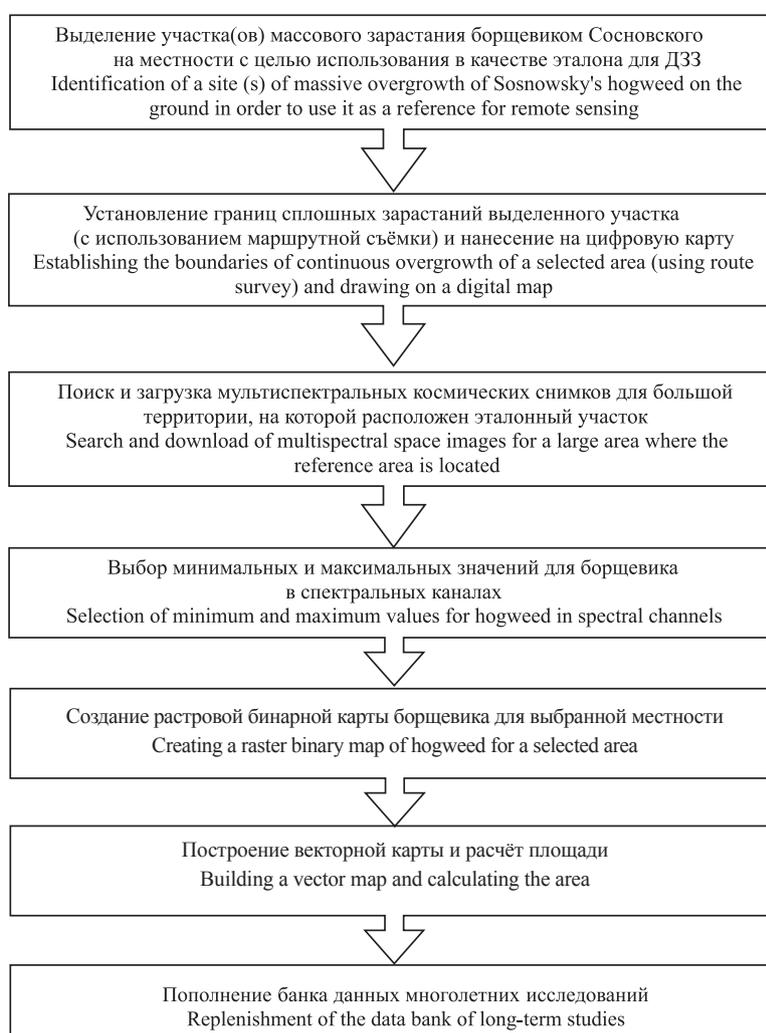


Рис. 1. Этапы обработки спутниковых изображений для обнаружения территорий, подверженных зарастанию борщевиком Сосновского
Fig. 1. The stages of satellite images processing to detect areas prone to overgrowing with Sosnowsky's hogweed

к западу от р. Вятки и представлял собой пригород с застройкой сельского типа, дачными участками и обширными неиспользуемыми землями вблизи д. Овчарное и д. Вахрино. Выбор участков был произведён в ходе полевого обследования территорий.

Снимки исследуемой территории за вегетационный период июнь – август 2016–2022 гг. были использованы с открытого сайта <https://eos.com/landviewer/>. Для обработки снимков применяли компьютерную программу QGIS-3.26. Для визуализации участков распространения борщевика Сосновского использовали каналы съёмки: B2 (синий), B3 (зелёный), B4 (красный) и B8 (ближний инфракрасный диапазон).

Результаты и обсуждение

В основе методики осуществляемого мониторинга лежали отличия в отражающей способности борщевика Сосновского от других объектов окружающей среды [21, 24]. В ходе исследования опирались на данные о том, что борщевик Сосновского имеет наиболее близкие значения яркости в синем и зелёном спектральных диапазонах, а наибольшие значения – в ближнем инфракрасном спектральном диапазоне съёмки [23].

Обработка фрагментов снимков со спутника Sentinel-2 в программе QGIS-3.26 позволила представить их в псевдоцветном изображении. Борщевик Сосновского на полученных изображениях выделялся ярко-зелёным цветом. Спектральные яркости пикселей, соответствующих данному виду, отличались от фоновых значений пикселей (другая растительность, антропогенные объекты и др.). Синтезированное изображение позволило выявить участки зарастания борщевиком Сосновского на исследуемых территориях.

Далее в геоинформационной системе QGIS-3.26 при помощи инструмента «Определить объекты» были выбраны максимальные и минимальные значения каналов, характерные для борщевика Сосновского. Каналы были окрашены в различные цвета. В местах произрастания борщевика участок приобретал определённую окраску. Применялась дискретная классификация из трёх классов: первый – минимальное из определённого, цвет – белый; второй – максимальное, цвет зависит от канала (B2, B3, B4 и B8), в этом диапазоне и обнаруживаются участки произрастания борщевика Сосновского; третий – значение выше максимального было также окрашено

в белый цвет. При снижении прозрачности до 50% белый цвет на снимке становился прозрачным, что позволило накладывать и совмещать изображения. Далее, совмещённое из четырёх каналов изображение было экспортировано в формате PNG с геопривязкой.

Полученное изображение было отредактировано в растровом редакторе GIMP-2. При помощи инструмента «Выделение по цвету», со значением порога, равным 0, производили удаление всех объектов, не относящихся к борщевик Сосновского.

На рисунке 2 (см. цветную вкладку III) приведены карты отдельных участков на территории г. Кирова, на которых удалось чётко визуализировать борщевик Сосновского по вышеописанной методике.

При помощи встроенных инструментов в системе QGIS переводили растровое изображение в векторное для расчёта площади распространения борщевика Сосновского. Встроенная функция позволяет вычислять площадь в установленных единицах на плоскости или на референц-эллипсоиде, если он установлен в ГИС-проекте.

В работе производили подсчёт площадей участков массового роста борщевика Сосновского на одной и той же территории за 7 лет (рис. 3). При сопоставлении расчётных данных и полученных карт за период 2016–2022 гг. идентифицированные зоны были представлены участками сплошного зарастания и распределения его небольшими группами. Площадь участков за это время значительно не изменилась (исключение составили 2020 и 2022 гг.), при этом регистрировали точечное перераспределение участков распространения борщевика Сосновского в пределах исследуемой территории. Подобная трансформация могла быть связана с применением различных мер борьбы с данным видом (кошение, вспашка, использование гербицидов и др.) или, напротив, с их отсутствием.

На основании результатов, полученных на данном этапе, не представлялось возможным рассчитать скорость разрастания борщевика Сосновского на исследуемой территории. Эту задачу можно решить только в условиях непрерывного наблюдения. Однако возможно рассчитать изменение площадей участков сплошного зарастания борщевиком Сосновского. У данной методики есть ограничения, так как она может быть применена только к тем территориям, где борщевик Сосновского не подвергался выкашиванию, либо другому воздействию на протяжении многих лет. Сущность методики за-

**Т. Я. Ашихмина, В. В. Рутман, Т. А. Адамович, Е. В. Товстик
«Мониторинг распространения *Heracleum sosnowskyi*
на урбанизированных территориях по данным
дистанционного зондирования Земли». С. 73.**



Заросли борщевика Сосновского
Thickets of *Heracleum sosnowskyi*

a) 08.08.2016



Заросли борщевика Сосновского
Thickets of *Heracleum sosnowskyi*

b) 13.08.2017



Заросли борщевика Сосновского
Thickets of *Heracleum sosnowskyi*

c) 17.06.2018



Заросли борщевика Сосновского
Thickets of *Heracleum sosnowskyi*

d) 09.06.2019



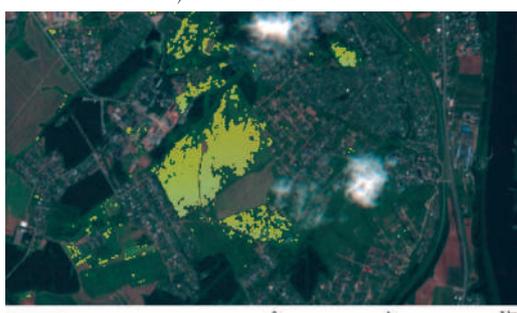
Заросли борщевика Сосновского
Thickets of *Heracleum sosnowskyi*

e) 16.08.2020



Заросли борщевика Сосновского
Thickets of *Heracleum sosnowskyi*

f) 23.06.2021



Заросли борщевика Сосновского
Thickets of *Heracleum sosnowskyi*

g) 06.07.2022

Рис. 2. Заросли борщевика Сосновского, выделенные на космических снимках
Fig. 2. Thickets of *Heracleum sosnowskyi*, identified on satellite images

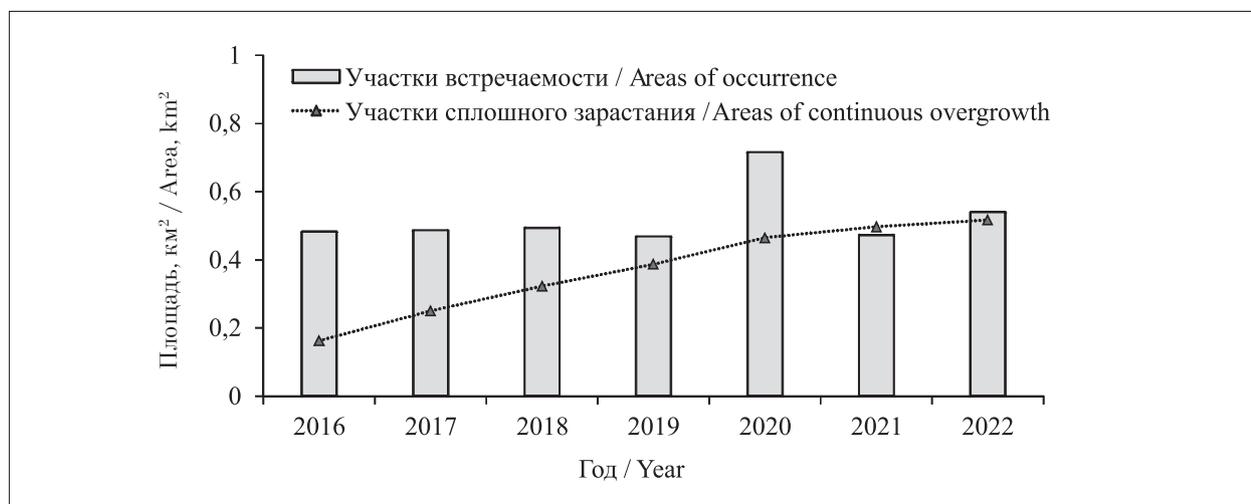


Рис. 3. Площадь территорий, занятых борщевиком Сосновского за 2016–2022 годы
 Fig. 3. Area occupied by Sosnowsky's hogweed for 2016–2022

ключается в том, что значение площади участков скопления борщевика Сосновского, полученное из векторной карты, вносится в программу для работы с таблицами, где производится подсчет разницы площадей по годам в квадратных метрах и в процентах по формуле:

$$R_{\%} = \frac{S_T - S_{II}}{S_{II}} \cdot 100,$$

где $R_{\%}$ – прирост борщевика на участке в процентах; S_T и S_{II} – площадь участков за текущий и предыдущий годы соответственно, м².

По результатам проведенных расчетов максимальный прирост борщевика Сосновского произошёл в период с 2016 г. по 2017 г. и составил 53,4% (рис. 3). За последующие годы наблюдений (2018–2021 гг.) сохранялась тенденция к увеличению площади участков сплошного зарастания борщевиком Сосновского на исследуемой территории (ежегодный прирост от 6,9 до 20,2%). Минимальный прирост (4%) отмечен в период с 2021 г. по 2022 г.

Заключение

В результате проведенной работы разработан новый метод обнаружения зон распространения борщевика Сосновского на отдельных участках г. Кирова по данным дистанционного зондирования Земли. Успешно решить поставленную задачу позволили космические снимки высокого разрешения с космического аппарата Sentinel-2. Использование в качестве исходной информации спутниковых снимков позволяет оперативно пополнять банк данных многолетних исследований в целях

мониторинга распространения борщевика Сосновского на отдельно взятых территориях. Предложенный в работе алгоритм обработки космических снимков позволил получить псевдоцветные изображения, с помощью которых была проведена классификация объектов окружающей среды, в том числе антропогенных, с выделением участков распространения борщевика Сосновского. С помощью полученных изображений был произведен расчёт площадей участков массового роста и сплошного зарастания территории исследуемым инвазивным видом.

Предложенная в работе методика обнаружения ареалов распространения борщевика Сосновского открывает новые возможности для мониторинга, а также для повышения эффективности мер борьбы с данным инвазивным видом.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Структура и состояние компонентов техногенных экосистем подзоны южной тайги», номер государственной регистрации в ЕГИСУ № 122040100032-5.

Литература

1. Diagne C., Leroy B., Gozlan R.E., Vaissière A.-C., Assailly C., Nuninger L., Roiz D., Jourdain F., Jarić I., Courchamp F. InvaCost, a public database of the economic costs of biological invasions worldwide // Scientific Data. 2020. V. 7. Article No. 277.
2. Сенатор С.А., Розенберг А.Г. Эколого-экономическая оценка ущерба от инвазивных видов рас-

тений // Успехи современной биологии. 2016. Т. 136. № 6. С. 531–538.

3. Юферев В.Г., Таранов Н.Н. Картографирование инвазивного загрязнения лесов Волго-Ахтубинской поймы с использованием ГИС технологий и результатов дистанционного зондирования // Известия НВ АУК. 2020. № 3 (59). С. 189–198.

4. Shrestha U.B., Shrestha B.V. Climate change amplifies plant invasion hotspots in Nepal // Diversity and Distributions. 2019. V. 25. No. 10. P. 1599–1612.

5. Banerjee A.K., Lee T.M., Feng H., Liang X., Lin Y., Wang J., Yin M., Peng H., Huang Y. Implications for biological invasion of non-native plants for sale in the world's largest online market // Conservation Biology. 2023. Article No. e14055.

6. Закон Московской области № 191/2014-ОЗ «О благоустройстве в Московской области» [Электронный ресурс] <https://gust.mosreg.ru/deyatelnost/knd/ot/kommentarii-o-soderzhanii-npa-ustanavliva-yushikh-obyazatelnye-trebovaniya-ot-vnesennykh-izmeneniyakh-rekomendacii-o-provedenii-meropriyatii-po-soblyudeniyu-ot/17-10-2018-11-01-12-18-07-2018-v-zakon-moskovskoy-oblasti-191-2014-oz> (Дата обращения: 18.06.2023).

7. Петрова И.Ф., Королева Е.Г. Оценка опасности распространения борщевика Сосновского в России // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2022. № 86 (5). С. 788–798.

8. Larson E.R., Graham B.M., Achury R., Coon J.J., Daniels M.K., Gambrell D.K., Jonasen K.L., King G.D., LaRacunte N., Perrin-Stowe T.I., Reed E.M., Rice C.J., Ruzi S.A., Thairu M.W., Wilson J.C., Suarez A.V. From eDNA to citizen science: emerging tools for the early detection of invasive species // Frontiers in Ecology and the Environment. 2020. V. 18. No. 4. P. 194–202.

9. Corbane C., Lang S., Pipkins K., Alleaume S., Deshayes M., Millán V.E.G., Strasser T., Borre J.V., Toon S., Michael F. Remote sensing for mapping natural habitats and their conservation status – New opportunities and challenges // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2015. V. 37. P. 7–16.

10. Yereña S., Toasa G., Kurbatova A.I. NDVI – alpha diversity relationship in tropical montane cloud forest of Ecuador // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 3. С. 58–67.

11. Домнина Е.А., Адамович Т.А., Тимонов А.С., Ашихмина Т.Я. Мониторинг зарастания заброшенных земель сельскохозяйственного назначения по спутниковым снимкам высокого разрешения // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 3. С. 82–89.

12. Кутявина Т.И., Рутман В.В., Ашихмина Т.Я. Дистанционный мониторинг зарастания высшей водной растительностью акватории эвтрофированного водохранилища // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 3. С. 36–40.

13. Григорьев А.Н., Зайцев В.В., Рыжиков Д.М., Чичкова Е.Ф. Способ определения параметров состояния

почвенно-растительного покрова по данным многоспектрального аэрокосмического зондирования // Патент Ru 2657363 С 1. Заявка: 2017113843, 20.04.2017. Дата публикации: 13.06.2018. Бюл. № 17.

14. Кравчук Л.А., Яновский А.А., Баженова Н.М., Пац А.Ч. Дифференцированная оценка зелёной инфраструктуры г. Минска с использованием данных дистанционного зондирования Земли // Природопользование. 2019. № 2. С. 152–167.

15. Elvidge C.D., Lyon R.J.P. Influence of rock-soil spectral variation on the assessment of green biomass // Remote Sensing of Environment. 1985. V. 17. No. 3. P. 265–279.

16. Хайруллин Р.Р., Мишуков О.А. Метод автоматизированного определения типов лесного растительного покрова по материалам аэрокосмической съёмки // I-methods. 2021. Т. 14. № 4. С. 1–15.

17. Товстик Е.В., Адамович Т.А., Ашихмина Т.Я. Идентификация участков массового роста борщевика Сосновского с помощью спектральных индексов по данным Sentinel-2 // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 3. С. 34–40.

18. Фомин Д.С., Чащин А.Н. Идентификация борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) по данным дистанционного зондирования Земли в Среднем Предуралье // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2019. № 1 (75). С. 68–70.

19. Kornilov T., Terentev A., Kekelidze V. Use of a hardware-software complex for phytosanitary monitoring and chemical treatments of the Sosnowski hogweed // BIO Web of Conferences: IV All-Russian Plant Protection Congress with international participation “Phytosanitary Technologies in Ensuring Independence and Competitiveness of the Agricultural Sector of Russia”. 2020. V. 8. Article No. 00015.

20. Visockienė J.S., Tumelienė E., Maliene V. Identification of *Heracleum sosnowskyi*-invaded land using Earth remote sensing data // Sustainability. 2020. V. 12. No. 3. Article No. 759.

21. Уифтер Т.Т., Разумный Ю.Н., Орловский А.В., Лобанов В.К. Мониторинг распространения борщевика Сосновского с использованием алгоритма машинного обучения «случайный лес» в Google Earth Engine // Компьютерные исследования и моделирование. 2022. Т. 14. № 6. С. 1357–1370.

22. Богданов В.Л., Осипов А.Г., Гарманов В.В. Методика мониторинга засорения земель борщевиком Сосновского по данным дистанционного зондирования // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2020. № 2 (59). С. 69–74.

23. Рыжиков Д.М. Метод обработки мультиспектральных спутниковых данных для решения задачи контроля зон произрастания борщевика Сосновского // Информационно-управляющие системы. 2017. № 6 (91). С. 43–51.

24. Рутман В.В., Кантор Г.Я. Изучение распространения борщевика Сосновского по космическим снимкам высокого разрешения // Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем: Материалы XX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Киров: Вятский государственный университет, 2022. С. 267–270.

References

- Diagne C., Leroy B., Gozlan R.E., Vaissière A.-C., Assailly C., Nuninger L., Roiz D., Jourdain F., Jarić I., Courchamp F. InvaCost, a public database of the economic costs of biological invasions worldwide // *Scientific Data*. 2020. V. 7. Article No. 277. doi: 10.1038/s41597-020-00586-z
- Senator S.A., Rozenberg A.G. Ecological and economic assessment of damage from invasive plant species // *Uspekhi sovremennoy biologii*. 2016. V. 136. No. 6. P. 531–538 (in Russian).
- Yuferev V.G., Taranov N.N. Mapping of invasive forest pollution in the Volga-Akhtuba floodplain using GIS technologies and remote sensing results // *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa*. 2020. No. 3 (59). P. 189–198 (in Russian). doi: 10.32786/2071-9485-2020-03-19
- Shrestha U.B., Shrestha B.B. Climate change amplifies plant invasion hotspots in Nepal // *Diversity and Distributions*. 2019. V. 25. No. 10. P. 1599–1612. doi: 10.1111/ddi.12963
- Banerjee A.K., Lee T.M., Feng H., Liang X., Lin Y., Wang J., Yin M., Peng H., Huang Y. Implications for biological invasion of non-native plants for sale in the world's largest online market // *Conservation Biology*. 2023. Article No. e14055. doi: 10.1111/cobi.14055
- Law of the Moscow Region No. 191/2014-OZ “On Improvement in the Moscow Region” [Internet recourse] <https://gust.mosreg.ru/deyatelnost/knd/ot/kommentarii-o-soderzhanii-mpa-ustanavlivayushikh-obyazatelnyetrebvaniya-ot-vnesennykh-izmeneniyakh-rekomendacii-o-provedenii-meropriyatii-po-soblyudeniyu-ot/17-10-2018-11-01-12-18-07-2018-v-zakon-moskovskoy-oblasti-191-2014-oz> (Accessed: 18.06.2023) (in Russian).
- Petrova I.F., Koroleva E.G. Assessment of the distribution of Sosnowsky's hogweed in Russia // *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2022. No. 86 (5). P. 788–798 (in Russian). doi: 10.31857/S2587556622050090
- Larson E.R., Graham B.M., Achury R., Coon J.J., Daniels M.K., Gambrell D.K., Jonasen K.L., King G.D., LaRacunte N., Perrin-Stowe T.I., Reed E.M., Rice C.J., Ruzi S.A., Thairu M.W., Wilson J.C., Suarez A.V. From eDNA to citizen science: emerging tools for the early detection of invasive species // *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2020. V. 18. No. 4. P. 194–202. doi: 10.1002/fee.2162
- Corbane C., Lang S., Pipkins K., Alleaume S., Deshayes M., Millán V.E.G., Strasser T., Borre J.V., Toon S., Michael F. Remote sensing for mapping natural habitats and their conservation status – New opportunities and challenges // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2015. V. 37. P. 7–16. doi: 10.1016/j.jag.2014.11.005
- Yerena S., Toasa G., Kurbatova A.I. NDVI – alpha diversity relationship in tropical montane cloud forest of Ecuador // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 3. P. 58–67 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-058-067
- Domnina E.A., Adamovich T.A., Timonov A.S., Ashikhmina T.Ya. Monitoring of overgrowing of abandoned agricultural lands using high-resolution satellite images // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 3. P. 82–89 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-082-089
- Kutyavina T.I., Rutman V.V., Ashikhmina T.Ya. Remote monitoring of overgrowth of the eutrophied reservoir water area by higher aquatic vegetation // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No 3. P. 36–40 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-036-040
- Grigorev A.N., Zaytsev V.V., Ryzhikov D.M., Chichkova E.F. Method for determining the parameters of the state of the soil and vegetation cover according to the data of multispectral aerospace sounding // Patent Ru 2657363 C 1. Application: 2017113843, 20.04.2017. Date of publication: 13.06.2018 (in Russian).
- Kravchuk L.A., Yanovskiy A.A., Bazhenova N.M., Pats A.Ch. Differentiated assessment of the green infrastructure of Minsk using the data of remote sensing of the Earth // *Prirodopolzovanie*. 2019. No. 2. P. 152–167 (in Russian).
- Elvidge C.D., Lyon R.J.P. Influence of rock-soil spectral variation on the assessment of green biomass // *Remote Sensing of Environment*. 1985. V. 17. No. 3. P. 265–279. doi: 10.1016/0034-4257(85)90099-9
- Khayrullin R.R., Mishukov O.A. The method for automated determination of forest cover types from aerospace images // *I-methods*. 2021. V. 14. No. 4. P. 1–15 (in Russian).
- Tovstik E.V., Adamovich T.A., Ashikhmina T.Ya. Identification of sites of mass growth of *Heracleum sosnowskyi* Manden. using spectral indices according to Sentinel-2 images // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 3. P. 34–40 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-034-040
- Fomin D.S., Chashchin A.N. Identification of Sosnowsky's hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) according to the remote sensing of the Earth in the Middle Ural // *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2019. No. 1 (75). P. 68–70 (in Russian).
- Kornilov T., Terentev A., Kekelidze V. Use of a hardware-software complex for phytosanitary monitoring and chemical treatments of the Sosnowsky's hogweed // *BIO Web of Conferences: IV All-Russian Plant Protection Congress with international participation “Phy-*

tosanitary Technologies in Ensuring Independence and Competitiveness of the Agricultural Sector of Russia". 2020. V. 8. Article No. 00015. doi: 10.1051/bioconf/20201800015

20. Visockienė J.S., Tumelienė E., Maliene V. Identification of *Heracleum sosnowskyi*-invaded land using Earth remote sensing data // Sustainability. 2020. V. 12. No. 3. Article No. 759. doi: 10.3390/su12030759

21. Yifter T., Razoumny Yu.N., Orlovsky A.V., Lobanov V.K. Monitoring the spread of Sosnowskyi's hogweed using a random forest machine learning algorithm in Google Earth Engine // Computer Research and Modeling. 2022. V. 14. No. 6. P. 1357–1370 (in Russian). doi: 10.20537/2076-7633-2022-14-6-1357-1370

22. Bogdanov V.L., Osipov A.G., Garmanov V.V. Methodology for monitoring of lands contamination by

Sosnovsky's hogweed according to remote sounding data // Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2020. No. 2 (59). P. 69–74 (in Russian). doi: 10.24441/2078-1318-2020-12069

23. Ryzhikov D.M. *Heracleum sosnowskyi* growth area control by multispectral satellite data // Informatiionno-upravlyayushchie sistemy. 2017. No. 6 (91). P. 43–51 (in Russian). doi: 10.15217/issn1684-8853.2017.6.43

24. Rutman V.V., Kantor G.Ya. Studying the distribution of Hogweed Sosnowski based on high-resolution satellite images // Biodiagnostics of the state of natural and natural-technogenic systems: Materialy XX Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. Kirov: Vyatskiy gosudarstvennyy universitet, 2022. P. 267–270 (in Russian).

The factors of forming the floristic structure of railway stations embankment (on the example of the Republic of Bashkortostan)

© 2023. S. A. Gareeva¹ ORCID: 0000-0002-7591-6262⁷

A. F. Khusainov² ORCID: 0000-0003-4116-1890⁷, L. M. Abramova³ ORCID: 0000-0002-3196-2080⁷

¹Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmullah,
3-a, Oktyabrskoy revoliucii St., Ufa, Russia, 450008,

²Ufa Multidisciplinary Professional College,
100/3, Rossiyskaya St., Ufa, Russia, 450100,

³Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences,
71, Prospekt Oktyabrya, Ufa, Russia, 450054,
e-mail: khusainovasa@mail.ru

Railroad embankments are special types of ruderal ecotopes in human-transformed areas. Railways are active channels for transzonal plant migration and are open to colonization by alien plant species. The aim of the research was to identify the factors of formation as well as the comparative analysis of the activity of partial floras species at six railway stations of the Republic of Bashkortostan located in three natural and climatic zones of the Southern Urals: the forest-steppe Cis-Urals, the steppe Trans-Urals and the Mountain-Forest Urals. The total flora comprised 288 species of vascular plants, including: 125 at the Kandry station, 124 at Buzdyak, 105 at Beloretsk, 128 at Inzer station, 157 at Sibai, 115 at Almukhametovo. A four-point scale of species activity was used for the comparative analysis of the flora of railway stations. It is shown that 21 species are found in all zones with the same degree of activity ("often" and "very often"). 125 species of vascular plants occur exclusively on the railway embankments of one of the studied stations. The flora of railway stations have similarities from 0.50 to 0.71 on the Sørensen-Czekanowski coefficient, which is provided by a common core of anthropotolerant species with a wide ecological amplitude. The differences reflect the zonal nature of vegetation and are formed through the participation of native flora species adapted to the specific substrates of railway embankment. Also the contribution of accidental drift of plant seeds is significant. The contribution of the zonal factor in various natural and climatic zones differs: the less difference between the railway ecotopes and the landscape and vegetation conditions of adjacent natural areas of the respective natural zone, the higher the participation of apophytic species in the forming of partial flora, and vice versa.

Keywords: Southern Urals, railway embankments, plant migration, flora, species activity, Sørensen-Chekanowski coefficient, zonal factor.

УДК 581.524 (470.57)

Факторы формирования флористической структуры насыпей железнодорожных станций (на примере Республики Башкортостан)

© 2023. С. А. Гареева¹, к. б. н., доцент, А. Ф. Хусайнов², к. б. н., доцент, Л. М. Абрамова³, д. б. н., профессор, г. н. с.,

¹Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы,
450008, Россия, г. Уфа, ул. Октябрьской революции, д. 3-а,

²Уфимский многопрофильный профессиональный колледж,
450100, Россия, г. Уфа, ул. Российская, д. 100/3,

³Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
450054, Россия, г. Уфа, пр. Октября, д. 71,
e-mail: khusainovasa@mail.ru

Железнодорожные насыпи – это особые типы рудеральных экотопов на трансформированных человеком территориях. Железные дороги являются активными каналами трансзональной миграции растений и открыты

для заселения чужеродными видами растений. Целью исследований было выявление факторов формирования и сравнительный анализ активности видов парциальных флор шести железнодорожных станций Республики Башкортостан, расположенных в трёх природно-климатических зонах Южного Урала: лесостепном Предуралье, степном Зауралье и Горно-лесном Урале. Общая флора составила 288 видов сосудистых растений, в том числе: на станции Кандры – 125, Буздяк – 124, Белорецк – 105, Инзер – 128, Сибай – 157, Альмухаметово – 115 видов. Для сравнительного анализа флор железнодорожных станций использовали четырёхбалльную шкалу активности видов. Показано, что во всех зонах с одинаковой степенью активности («часто» и «очень часто») встречается 21 вид. 125 видов сосудистых растений встречаются исключительно на железнодорожных насыпях одной из изучаемых станций. Флоры железнодорожных станций имеют сходство от 0,50 до 0,71 по коэффициенту Сьёренсена-Чекановского, которое обеспечивается общим ядром антропо tolerantных видов с широкой экологической амплитудой. Различия отражают зональный характер растительности и формируются за счёт участия видов местной флоры, приспособленных к произрастанию на специфических субстратах железнодорожных насыпей. Значителен также вклад случайного заноса семян растений. Вклад зонального фактора в разных природно-климатических зонах различен – чем меньше отличия железнодорожных экотопов от ландшафтно-растительных условий прилегающих естественных участков соответствующей природной зоны, тем выше участие апофитных видов в сложении парциальной флоры и наоборот.

Ключевые слова: Южный Урал, железнодорожные насыпи, миграция растений, флора, активность видов, коэффициент Сьёренсена-Чекановского, зональный фактор.

Railway embankments are special, isolated types of ruderal ecotopes in human-transformed areas. Railway embankments are most often composed of crushed hard rock, gravel, a mixture of gravel and sand, or other ballast materials. The distinctive features of these anthropogenically formed substrates include irregular and insufficient moisture supply, excessive insolation, mobility, vibration and wind currents from passing trains, the use of herbicides to destroy unwanted vegetation, as well as a more favorable temperature background during the growing season, exceeding the ambient temperature by 0.5–4.0 °C [1].

Railways are anthropogenically transformed technogenic ecotopes, similar to the heap dumps of mining enterprises [2], since during their construction the vegetation is completely destroyed and the formed embankments are overgrown with newly introduced, often alien, plants. The role of railway transport, as an important factor in the transfer of plants to new territories, is great and these processes are not well understood, which determines the relevance of this work. The floras of railways became the objects of research by domestic [3–10] and foreign scientists [11–15].

The purpose of our research was to identify the factors of formation and comparative

analysis of the activity of species of partial floras of railway embankments within stations in three natural and climatic zones of the Republic of Bashkortostan (RB) – Cis-Ural forest-steppe (Cis-Urals), Mountain-forest (Mountain Urals) and Trans-Ural steppe (Trans-Urals) zones.

Materials and methods of research

On the territory of the Republic of Bashkortostan from west to east there are railway branches of the Bashkir branch of the Kuibyshev (KubZhD) and South Ural (SUZhD) railways, which cross three natural and climatic zones – the Cis-Urals, the Mountain Urals and the Trans-Urals.

The studies were carried out for 9 years, 2 railway stations were surveyed in each zone. The material was collected on the railway embankments of the stations Kandra, Buzdyak, Beloretsk, Inzer (KubZhD), Sibay, Almukhame-tovo (Southern Railway). The characteristics of the natural and climatic conditions of the study areas are given in Table 1 [16].

The collection of material was carried out by the traditional route method for floristic research, during which more than 500 herbarium sheets were collected. The railway track within the boundaries of the station was examined,

Table 1

The characteristics of the natural and climatic conditions of the studied areas

Parameter	Cis-Urals	Mountain Urals	Trans-Urals
Average annual precipitation, mm	450	550	350
The amount of precipitation during the growing season, mm	200	250	185
Average annual temperature, °C	2.8	1.0	1.8
The sum of active temperatures, °C	2300	1600	2010
Hydrothermal coefficient	1.2	1.5	1.0
Zonal confinement	forest-steppe	mountain-forest	steppe

Table 2

Systematic composition of the railway embankments flora in three natural and climatic zones of the Republic of Bashkortostan

Taxonomic categories	Natural and climatic zone			
	Cis-Urals	Mountain Urals	Trans-Urals	total
	number			
Species	161	156	191	288
Genus	124	112	124	181
Family	32	32	31	39
Main systematic groups	number of species			
Equisetophyta	1	1	undetected	1
Magnoliophyta:	160	155	191	287
Liliopsida	25	25	25	40
Magnoliopsida	135	130	166	247

Table 3

Indicators of the railway embankment floristic richness at the stations in three natural and climatic zones of the Republic of Bashkortostan

Zone	Station name	Flora options									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cis-Urals	Buzdyak	124	101	31	1.2	4.0	3.6	17.1	1.5	46.0	37.1
	Kandry	125	98	26	1.3	4.8	3.8	15.3	1.8	45.6	32.8
Mountain Urals	Beloretsk	105	83	28	1.3	3.8	3.0	16.3	1.8	39.0	32.4
	Inzer	128	99	29	1.3	4.4	3.4	18.9	1.5	34.4	32.0
Trans-Urals	Almukhametovo	115	84	26	1.4	4.4	3.2	15.6	1.4	46.1	42.6
	Sibay	157	111	29	1.4	5.4	3.8	12.7	2.1	42.6	32.5

Note: Flora options: 1 – number of species; 2 – number of genera; 3 – number of families; 4 – average number of species in the genus; 5 – average number of species in the family; 6 – average number of genera in the family; 7 – % of Monocotyledons in the flora; 8 – ratio of the number of Asteraceae/Poaceae species; 9 – proportion of adventitious species; 10 – proportion of terophytes.

including a ballast prism, roadsides, embankments of abandoned branches and the territory of stations, the main covering of which is crushed stone soil with wooden and reinforced concrete sleepers.

Plants were identified according [17–21], species names are given according [22].

For a comparative analysis of the floras of railway stations, the concept of “species activity” was used, expressed through the occurrence of a species [23, 24], for which a four-point scale was used [25]: “very often” (4 points), if the species occurs widely throughout the territory stations and numerous in typical habitats; “often” (3 points) if the species is found in all or almost all of the habitats indicated for it throughout or almost throughout the territory of the station; “rarely” (2 points), when the probability of finding it in suitable habitats is low, and it is noted not at all stations; “very rarely” (1 point), when species are singly recorded in one or several points.

To compare the floras of the embankments of railway stations, the Sørensen-Czekanowski similarity coefficient was used.

Results and discussion

Table 2 shows the taxonomic and systematic characteristics of the flora of railway station embankments in three climatic zones of the Southern Urals. The analysis showed that 288 species from 181 genera and 39 families were registered in the flora. The largest number of species was noted at the stations of the Southern Urals Railway (Trans-Urals) – 191 species, the smallest – at the stations of the Mountain Urals (156 species). This is due to the fact that the natural conditions of the Trans-Urals (high summer temperatures, excessive insolation, lack of moisture, stony soils) are close to the conditions formed on the technogenic substrates of railway embankments, which contributes to the survival of ovules of steppe and petrophytic plant species on them, and the conditions of the Mountain Urals – on the contrary, they differ from them to the greatest extent, therefore it is difficult for plants of the forest zone to adapt to this substrate. The overwhelming dominance of angiosperms and dicotyledon plants was

Table 4

Plant species with high activity (in points) in all climatic zones

Species	Activity at railway stations					
	Kandry	Buzdyak	Beloretsk	Inzer	Sibay	Almukhametovo
<i>Artemisia austriaca</i>	3	3	3	3	3	3
<i>Bromopsis inermis</i>	3	3	3	3	3	3
<i>Echium vulgare</i>	3	3	3	3	3	3
<i>Pastinaca sylvestris</i>	3	3	3	3	3	3
<i>Melilotus officinalis</i>	3	3	3	3	3	3
<i>Conyza canadensis</i>	4	4	3	3	3	3
<i>Poa pratensis</i>	4	4	2	2	3	3
<i>Dracocephalum thymiflorum</i>	3	3	2	2	2	2
<i>Setaria pumila</i>	3	3	2	2	2	2
<i>Setaria viridis</i>	3	3	2	2	2	2
<i>Inula britannica</i>	3	3	2	2	2	2
<i>Convolvulus arvensis</i>	3	3	3	3	2	2
<i>Taraxacum officinale</i>	3	3	3	3	2	2
<i>Lappula squarrosa</i>	3	3	2	2	3	3
<i>Potentilla argentea</i>	3	3	2	2	3	3
<i>Elytrigia repens</i>	3	3	3	3	4	4
<i>Calamagrostis epigeios</i>	2	2	3	3	4	4
<i>Chenopodium album</i>	3	3	2	2	4	4
<i>Puccinellia distans</i>	3	3	2	2	4	4
<i>Polygonum aviculare</i> s.l.	3	3	2	2	4	4
<i>Lactuca serriola</i>	2	2	2	2	3	3

Note: activity (occurrence; in points): 4 – very often, 3 – often, 2 – rarely, 1 – very rarely.

revealed, higher spore plants are represented by a single species – *Equisetum arvense* L.

Table 3 reflects the floristic richness of railway embankments within individual stations. Here, the maximum number of species (157) was recorded at the Sibay station in the Trans-Urals, and the minimum (105) was recorded at the Beloretsk station located in the Mountain Urals. In general, the main characteristics of the floras of railway stations are comparable. The proportion of monocotyledonous plants is higher at the Inzer station of the Mountain Urals, and the proportion of adventitious species and terophytes is higher at Almukhametovo station in the arid Trans-Urals.

We have assessed the activity of species at all six surveyed railway stations. Tables 4 and 5 include species with activity at least at one of the stations of at least 3 points. It should be noted that in all partial floras of railway station embankments, species with a low occurrence prevailed, but in each zone, species were noted that, due to their ecological and biological characteristics, dominate and play the main role in the formation of communities.

Table 4 includes only species with high activity (3–4 points) at two or more railway stations. Based on Table 4, it can be seen that

21 species are found in all zones with the same degree of activity (“often” and “very often”). These are species that withstand strong heating of the substrate, aridity and anthropogenic pressure. Most of them are perennials adapted to the conditions of substrate mobility. For example, *Artemisia austriaca* Jacq., *Echium vulgare* L., *Elytrigia repens* (L.) Nevski, *Melilotus officinalis* (L.) Pall., widely distributed in Bashkortostan, belong to this group. At the same time, some species change the degree of activity in different climatic zones – for example, *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth, *Chenopodium album* L., *Elytrigia repens* (L.) Nevski., *Puccinellia distans* (Jacq.) Parl, *Polygonum aviculare* s.l. more active in the Trans-Urals are *Conyza canadensis* (L.) Cronq., *Dracocephalum thymiflorum* L., *Setaria pumila* (Poir.) Schult., *S. viridis* (L.) Beauv. and others – in the Cis-Urals, a number of species reduce activity in the Mountain-forest zone. Some of the species with higher activity (“very often”) in certain zones are anthropotolerant apophytes, for example, *Poa pratensis* L., *C. epigeios*, some are cosmopolitans, for which optimal edapho-climatic conditions for growth have been created on railway embankments, e. g. *C. canadensis*, *E. repens*.

A number of species, due to their ecological and biological characteristics, are confined to only one natural and climatic zone. So, 4 species gravitate to the Cis-Urals: *Chelidonium majus* L., *Erodium cicutarium* (L.) L'Hér., *Leonurus quinquelobatus* Gilib., *Eragrostis pilosa* (L.) Beauv.; to the Ural Mountains 5 mesophytic meadow and edge species – *Plantago lanceolata* L., *Carex contigua* Hoppe, *Poa palustris* L., etc.; to the Trans-Urals – 15 species typical of the steppes – *Bassia sedoides* (Pall.) Aschers., *Caragana frutex* (L.) C. Koch, *Stipa capillata* L., etc. Only one apophytic species (*Plantago lanceolata* L.) is confined to the Mountain-forest zone, while in other zones the number of these species is much larger.

We have found that 125 species of vascular plants are found exclusively on the railway embankments of one of the studied stations. Most of these species are included in the most common plant communities of the corresponding soil-climatic zones (*Plantago urvillei* Opiz, *Scorzonera purpurea* L. – steppe meadows of the Cis-Urals; *Alopecurus pratensis* L., *Origanum vulgare* L. – meadows and edges of the Mountain forest zone; *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn., *Fragaria vesca* L. – forests of the Mountain forest zone; *Plantago salsa* Pall., *Glycyrrhiza korshinskyi* Grig. – meadows on saline soils of the Trans-Urals; *Gypsophila altissima* L., *Stipa lessingiana* Trin. & Rupr. – steppes of the Trans-Urals) and etc. Their appearance on railway embankments is accidental, and most often associated with the proximity of these ecotopes to dissemination sources. However, this group of species grows quite successfully on embankments, which sometimes allows them to be classified as active species. In this group, many species are weed-ruderal plants with a wide range, their appearance depends on the same random pattern of introduction – *Brassica campestris* L., *Rorippa austriaca* (Grantz) Bess., *Ambrosia psyllostachya* DC. and others. They are active at the stage of colonization of the substrate free from vegetation. With the restoration of vegetation, these species lose their coenotic role, giving way to apophytes. Possessing low competitive ability, they have low activity rates in certain points.

A different number of species is associated with specific stations in different zones: 43 species at Sibay station, 28 at Inzer, 16 at Almukhametovo, 15 at Kandy, 14 at Buzdyak, and 9 at Beloretsk. Most of all (43 species) occurs at the Sibay station of the Trans-Urals, and less (9 species) at the Beloretsk station of the Mountain Urals. This is due to the fact that in the steppe zone of the Trans-Urals, the introduction

of plants from the steppe landscapes surrounding the railroad becomes more important, which is facilitated by the openness of these habitats and the anemochory of many steppe species, and also, possibly, by the fact that there is a grain elevator near the Sibay station, from where diaspores of weeds can be introduced. The survival rate of ovules is also higher here due to the already mentioned similarity of many parameters of the steppe and railway ecotopes in terms of warming, aridity, and rockiness of the substrate. In the conditions of the Mountain Urals, the circle of potential settlers in technogenic ecotopes is narrowed due to the large difference in the conditions of slopes and natural habitats.

Table 5 shows species with a wide variation in occurrence (from 0 to 4) at different stations, which, in our opinion, depend on various, often random, factors. Thus, the absence of the invasive neophyte *Hordeum jubatum* L. at Kandy station is most likely due to the inaccessibility of dissemination sources. The absence of a number of ruderal species at the stations Inzer and Beloretsk, as well as Sibay and Almukhametovo, is explained by the fact that in the mountain forest zone and the steppe Trans-Urals, local species adapted to the soil and climatic conditions of the Mountain Urals and Trans-Urals become more important in the settlement of railway embankments. High persistence of *Amaranthus retroflexus* L., *Cirsium setosum* (Willd.) Bess. at the Sibay station, possibly is due to the proximity to the grain elevator.

The assessment of the similarity coefficient according to Sørensen-Chekanovskiy (Table 6) showed that the partial floras of all the studied stations are quite similar to each other (similarity coefficients are 0.50–0.71).

The relatively high floristic similarity of the stations Kandra and Buzdyak (0.71) is associated with their location in similar natural and climatic conditions of the western Cis-Urals. The lower coefficient of floristic similarity of Almukhametovo and Sibay stations with Inzer station (0.50 and 0.51) is associated with their location in different soil-climatic zones (mountain-forest and steppe).

Thus, the common core tends to be composed of active species, which are most often cosmopolitan or species with a wide ecological range. The differences are associated with the presence of species confined to one station or one or several stations, location in different climatic zones, the nature of the use of the station, the processing of the railway track, and the accidental introduction of plant seeds.

Table 5

Plant species activity (in points) at different railway stations

Species	Activity at railway stations					
	Kandry	Buzdyak	Beloretsk	Inzer	Sibay	Almukhametovo
<i>Hordeum jubatum</i>	–	4	3	3	4	4
<i>Xanthium albinum</i>	3	–	2	2	2	2
<i>Lepidium ruderae</i>	2	2	–	2	3	3
<i>Atriplex tatarica</i>	4	4	3	–	4	4
<i>Geranium sibiricum</i>	3	3	2	2	–	2
<i>Potentilla norvegica</i>	3	3	2	2	–	2
<i>Amaranthus retroflexus</i>	3	3	2	2	3	–
<i>Cirsium setosum</i>	3	3	2	2	4	–
<i>Persicaria lapathifolia</i>	–	–	3	3	2	2
<i>Carduus crispus</i>	3	–	2	2	4	–
<i>Carduus acanthoides</i>	3	3	–	–	4	4
<i>Echinochloa crusgalli</i>	3	3	–	2	1	–
<i>Sonchus arvensis</i>	3	3	2	–	2	–
<i>Kochia scoparia</i>	–	4	2	–	0	4
<i>Amaranthus blitoides</i>	2	–	–	–	3	3
<i>Bromus squarrosus</i>	3	–	–	3	3	–
<i>Centaurea scabiosa</i>	3	3	–	–	3	–
<i>Poa compressa</i>	3	–	–	–	–	3

Note: for the activity scale, see Table 4; a dash means no detected species at the station.

Table 6

Indicators of the similarity of the floras of railway stations according to the Sørensen-Czekanowski coefficient

Station name	Kandry	Buzdyak	Beloretsk	Inzer	Sibay	Almukhametovo
Kandy		0.71	0.60	0.58	0.57	0.59
Buzdyak	0.71		0.58	0.57	0.56	0.62
Beloretsk	0.60	0.58		0.66	0.53	0.60
Inzer	0.58	0.57	0.66		0.50	0.51
Sibay	0.57	0.56	0.53	0.50		0.58
Almukhametovo	0.59	0.62	0.60	0.51	0.58	

Conclusion

Thus, railway tracks, being special types of technogenic habitats (mobile gravel substrate, openness, strong warming, insolation, drainage), are constantly open for colonization by ruderal or natural plant species. Railways are active channels for transzonal plant migration. At the same time, a continuous vegetation cover cannot fully form on the railways due to difficult edapho-climatic conditions and constant or regular disturbance.

Partial floras of railway embankments of stations are composed of two components, depending on various factors affecting their composition. First, they have a rather large core of common active species, represented mainly by cosmopolitan and anthropotolerant species,

which reflect the anthropogenic impact on this type of vegetation. Secondly, differences in their composition are mainly formed due to the types of local flora adapted to growing on specific railway substrates. These differences reflect the zonal nature of the vegetation surrounding the railways, as well as a number of random factors, which together also have a significant impact on the formation of the floristic composition of each particular railway station. The contribution of the zonal factor in different natural and climatic zones is different – the smaller the difference between the railway ecotopes and the landscape and vegetation conditions of the adjacent natural areas of the corresponding natural zone, the higher the participation of apophytic species in the formation of partial flora and vice versa. For railway floras, the contribution of accidental

skidding is also significant, which in some cases can even exceed the influence of the zonal factor.

The authors are grateful to the head of the UFA herbarium, PhD A.A. Muldashev and PhD, associate professor A.N. Puzyrev for help in species identification.

The work was carried out on the topic “Biodiversity of natural systems and plant resources of Russia: assessment of the state and monitoring of dynamics, problems of conservation, reproduction, increase and rational use” within the framework of the state assignment of the South Ural Botanic Garden-Institute of the South Ural Research Center of the Russian Academy of Sciences, No. 075-03-2022-001 dated 14.01.2022.

References

1. Bulokhov A.D. Termophilous communities of railway embankments in the South Nechernozemye of Russia (within the Bryansk region) // Bulletin of Bryansk department of Russian botanical society. 2017. No. 4 (12). P. 16–28 (in Russian). doi: 10.22281/2307-4353-2017-4-16-28
2. Artamonova V.S., Bortnikova S.B. Soil-like formation in technogenic landscapes: history of study, terminology, modern aspects (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2017. No. 1. P. 4–13 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-1-004-013
3. Skvorcova I.V., Berezuckiy M.A. Railway embankment flora in the Southern Volga height // Povolzhskiy ekologicheskiy zhurnal. 2008. No. 1. P. 55–64 (in Russian).
4. Tolmachev A.I. Methods of comparative floristics and florogenesis. Novosibirsk: Naukova dumka, 1986. P. 11–90 (in Russian).
5. Tretyakova A.S. The role of railroads in the formation of synanthropic flora in the Middle Urals // Russian Journal of Ecology. 2010. V. 41. No. 2. P. 123–128 (in Russian). doi: 10.1134/S1067413610020037
6. Senator S.A., Nikitin N.A., Saksonov S.V., Rakov N.S. Factors determining the formation of flora of the railways // Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2012. V. 14. No. 1–4. P. 261–266 (in Russian).
7. Senator S.A., Tohtar' V.K., Kurskoy A.Yu. Materials on the flora of the Belgorod Region railways // Vestnik Udmurtskogo universita. 2016. V. 26. No. 4. P. 50–59 (in Russian).
8. Arepieva L.A. The vegetation on railway embankments of the Kursk Region // Vegetation of Russia. 2017. No. 30. P. 3–28 (in Russian). doi: 10.31111/vegus/2017.30.3
9. Bochkin V.D., Vinogradova Yu.K. Flora of the railways in Moscow city // Vestnik Permskogo universiteta. 2016. No. 2. P. 89–95 (in Russian).
10. Muldashev A.A., Husainova S.A., Husainov A.F. New finds of adventive plants in the Republic of Bashkortostan // Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2014. V. 16. No. 1. P. 69–73 (in Russian).
11. Burda R.I., Tokhtar V.R. Invasion, distribution and naturalization of plants along railroads of the Ukrainian south-east // Ukrainian Botanical Journal. 1992. V. 49. No. 5. P. 14–18.
12. Vogel P. Bemerkenswerte Pflanzenfunde auf den Bahnanlagen der Deutschen Bundesbahn im Stadtgebiet von Karlsruhe // Carolinea. 1996. V. 54. P. 37–44 (in German).
13. Czarna A. Vascular flora of the railway station in Jarocin (Western Poland) // Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu. CCCLXXIII. Bot.-Stec. 2005. V. 9. P. 39–46.
14. Alessandrini A. Flora degli ambienti ferroviari. Lo Scalo San Donato a Bologna // Quaderni del Museo Civico di Storia Naturale di Ferrara. 2016. V. 4. P. 37–44 (in Italian).
15. Wrzesie M., Jachula J., Denisow B. Railway embankments – a refuge areas for food flora, and pollinators in agricultural landscape // Journal of Apicultural Science. 2016. V. 60. No. 1. P. 97–110. doi: 10.1515/jas-2016-0004
16. Kadil'nikov I.P., Cvetaev A.A., Smirnova E.S., Hismatov M.F. Physical-geographical regionalization of the Bashkir ASSR. Ufa: Kytap, 2005. 212 p. (in Russian).
17. The Flora of Eastern Europe. V. 9 / Ed. N.N. Tsvelev. Sankt-Peterburg: Mir i semya-95, 1996. 451 p. (in Russian).
18. The Flora of Eastern Europe. V. 10 / Ed. N.N. Tsvelev. Sankt-Peterburg: Mir i semya; Izdatelstvo SPKhFA, 2001. 670 p. (in Russian).
19. The Flora of Eastern Europe. V. 11 / Ed. N.N. Tsvelev. Moskva, Sankt-Peterburg: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2004. 535 p. (in Russian).
20. The key to higher plants of the Bashkir ASSR. Moskva: Nauka, 1988. 316 p. (in Russian).
21. The key to higher plants of the Bashkir ASSR. Moskva: Nauka, 1989. 375 p. (in Russian).
22. Cherepanov S.K. Vascular plants of Russia and adjacent states (within the former USSR). Sankt-Peterburg: Mir i semya, 1995. 992 p. (in Russian).
23. Yurcev B.A. Theoretical and methodological problems of comparative floristry // Materialy 2 Rabochego soveshchaniya po sravnitel'noy floristike. Leningrad: Nauka, 1983. 270 p. (in Russian).
24. Panasenko N.N. Activity of some invasive species on the territory of the Bryansk region // The study and protection of the flora of Central Russia: Materialy VII nauch. soveshch. po flore Sredney Rossii. 2011. P. 108–111 (in Russian).
25. Baranova O.G., Puzyrev A.N. Synopsis of the flora of the Udmurt Republic (vascular plants). Moskva; Izhevsk: Institut kompyuternykh issledovaniy, 2012. 212 p. (in Russian).

Macrophyte thicket ecosystems in the Neva Bay: a response to hydraulic construction impact

© 2023. V. A. Zhigulsky¹ ORCID: 0000-0001-9971-9266, V. F. Shuisky¹ ORCID: 0000-0002-6110-823X,
E. Yu. Chebykina¹ ORCID: 0000-0002-2449-2180, D. V. Zhigulskaya² ORCID: 0000-0003-3163-4308,
¹“Eco-Express-Service” LLC,
32/3, Zanevsky Prospekt, Saint-Petersburg, Russia, 195112,
²ECOPLUS LLC,
P.O. Box 123, Saint-Petersburg, Russia, 195027,
e-mail: ecoplus@ecoexp.ru

The first stage results (2016–2020) of the scientific research programme of macrophyte thickets ecosystems (so-called “reed beds”) in the Neva Bay of the Gulf of Finland have been summed up. The programme is carried out by the environmental design company “Eco-Express-Service” LLC (initiator, coordinator, sponsor and main executor) with the participation of a group of St. Petersburg biologists. Observations are carried out at 16 model parcels of thickets (the area of each plot is about 1 km²). Maps of phytocenoses, fish spawning places, migratory stopovers for aquatic and semi-aquatic birds, as well as summary maps of the resulting ecological value were compiled.

According to main indicators, the macrophyte thickets ecosystems that have appeared before and during Saint Petersburg Flood Prevention Facility complex construction (1979–2011) turned out to be the most environmentally valuable. The last ones have some advantages, since they are still less dense, more mosaic, and therefore available for fish and birds settlement not only along the periphery of plant massifs, but also inside them. Younger thickets that have appeared in new biotopes in the past decade are much less actively used by the biota, but they represent a valuable reserve for future macrophyte thickets ecosystems. The sensitivity of macrophyte thickets to hydraulic works and their consequences increases with the age of thickets: the youngest ecosystems formed under the conditions of technogenic impact are the most resistant. On the whole, it should be noted that macrophyte thickets are highly resistant to hydraulic works, except their direct mechanical destroying. The projective cover degree of biotopes by vegetation depend much less on the ongoing hydraulic works, than on the general trend of its technogenic succession.

Keywords: macrophytes thickets, reed bed, Neva Bay, Eastern part of the Gulf of Finland, hydraulic works, aerial survey.

УДК 574.58

Зарослевые экосистемы Невской губы: реакция на гидростроительство

© 2023. В. А. Жигульский¹, к. т. н., директор,
В. Ф. Шуйский¹, д. б. н., начальник отдела,
Е. Ю. Чебыкина¹, к. б. н., зам. начальника отдела,
Д. В. Жигульская², к. и. н., зав. лабораторией,
¹ООО «Эко-Экспресс-Сервис»,
195112, Россия, г. Санкт-Петербург, Заневский пр., д. 32/3,
²ООО «ЭКОПЛУС»,
195027, Россия, г. Санкт-Петербург, а/я 123,
e-mail: ecoplus@ecoexp.ru

Подведены итоги первого этапа (2016–2020 гг.) научной программы комплексных исследований экосистем макрофитных зарослей (так называемых «плавней») Невской губы Финского залива. Программа выполняется эколого-проектной компанией «Эко-Экспресс-Сервис» (инициатор, координатор, спонсор и основной исполнитель) при участии группы Санкт-Петербургских биологов. Наблюдения ведутся на 16 эталонных участках плавней (площадь каждого – около 1 км²). Составлены карты фитоценозов, нерестилиц рыб, миграционных стоянок водоплавающих и околоводных птиц, а также сводные карты результирующей экологической ценности.

По всем основным показателям наиболее экологически ценными оказались плавни, возникшие ещё до начала сооружения комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений или в ходе его строительства

(1979–2011 гг.). Последние имеют некоторые преимущества, поскольку пока ещё менее плотны, более мозаичны и потому доступны для освоения рыбами и птицами не только по периферии растительных массивов, но также и внутри их. Более молодые заросли, возникшие в новых биотопах в истекшее десятилетие, используются биотой значительно менее активно, однако представляют собой ценный резерв будущих полноценных плавней. Чувствительность зарослевых экосистем к гидротехническим работам (ГТР) и их последствиям закономерно возрастает с возрастом плавней: наиболее молодые экосистемы, сформировавшиеся в условиях техногенного воздействия, наиболее к нему устойчивы. В целом же следует отметить высокую устойчивость макрофитных зарослей к воздействию ГТР, за исключением их прямого механического уничтожения. Показатели проективного покрытия биотопов растительностью зависят от ведущихся ГТР гораздо меньше, чем от общего хода её техногенной сукцессии.

Ключевые слова: заросли макрофитов, плавни, Невская губа, восточная часть Финского залива, гидротехнические работы, аэрофотосъёмка.

The aquatic vegetation of shallow waters in the Neva Bay (NB) and Eastern Gulf of Finland (EGoF) create special ecosystems (reed beds). Their environmental role is important and multifaceted. They stabilize the shore and coastline soils, favour for purifying waters, serve as edificators and regulator of diverse zoocenoses. Many fish species spawn here, in macrophyte thicket ecosystems, and then juveniles immediately grow up there [1–5].

Aquatic and semi-aquatic birds use macrophyte thicket ecosystems for their life existence, nesting and rest during seasonal migrations [6–10]. The Neva Bay is one of the most important water areas in the North-West of Russia in this regard [11–13]. This is the place where main branches of the White Sea – Baltic migration route converge. The rest in shallow water areas of the Neva Bay during migrations (especially spring) is very important and vital for aquatic and semi-aquatic birds. This is the key to their successful further flight to the harsh northern conditions of the north and north-west of the European part of Russia. Therefore, the protection of resting places for migratory birds there has global and priority environmental importance. As a result, numerous specially protected natural areas of the Neva Bay are primarily focused on this task and are confined precisely to shallow waters overgrown with macrophytes.

Hydraulic and construction works in EGoF have actively been carried out during last decades. Firstly, the largest and most influential for the ecosystem of the Neva Bay object should be mentioned – the Saint Petersburg Flood Prevention Facility complex (FPFC) [14, 15]. Moreover, new port complexes have been created there. Plural artificial land plots have arisen and now are creating. New approach navigation channels have been constructed. Since both old and new navigation canals are constantly being covered with soil, their operation also requires regular dredging.

It is clear that all these processes have a more or less negative impact on the marine environment, including macrophyte thickets. The key factors for the biota of thickets are seabed violation (biotopes destruction) and sedimentation. At the same time, macrophyte thicket ecosystems can lose their functions listed above, which are significant regionally and even globally [16, 17].

The closer a specific macrophyte thickets area is to the place of hydraulic works, the stronger and more obvious their negative impact is. However, actually this influence has a more complex and ambiguous character, which manifests when the spatial scales of its assessment change. Thus, the FPFC construction changed the local hydrological regime and led to the active growth of macrophyte thickets [2, 18, 19].

The mechanism of this peculiar autocompensation of macrophyte thickets resources has not been sufficiently studied. It is only clear that the final balance of negative, neutral and positive effects of hydraulic construction for macrophyte thicket ecosystems is dynamic, complex, spatially extremely heterogeneous and varies significantly depending on spatial limits of the assessment [20, 21].

This manuscript presents some results of a comprehensive research programme “Macrophyte thicket ecosystems of the Neva Bay”. This programme is developed, being coordinated and implemented by the environmental design company “Eco-Express-Service” with the participation of experts from leading scientific organizations of St. Petersburg.

The main purpose of the work was to assess the resources of macrophyte thicket ecosystems of the Neva Bay and to identify the patterns of their technogenic dynamics.

Materials and methods

A system of so-called “model parcels” of macrophyte thickets was developed and used in

order to solve these tasks. These areas were selected according to the concept that complex of model parcels should reflect all main possible combinations of the following three factors gradations: vegetation age; technogenic impact degree; location: near FPFC (as the main environment-forming hydraulic structure for the studied water area) or far from it (i. e. outside of its direct impact).

Three thicket age gradations were studied (examples at Figure 1): 1 – thickets that have been formed before the FPFC construction (“old macrophyte thicket ecosystems”); 2 – thickets that have appeared during FPFC construction (1979–2011 [10]) (“middle-aged”); 3 – thickets that have appeared after the FPFC was fully built and put into operation.

Hydraulic works impact level (both ongoing and already completed, but retaining their after-effect on the ecosystem) was also divided into three gradations: a – strong; b – moderate, but significant; c – not reliably distinguishable from the general background anthropogenic impact.

Finally, the names of model parcels located far from FPFC and near it include capital letters A and B, respectively.

It turned out that 14 out of 18 theoretically possible combinations of these factorial gradations really exist (Table). The area of each model parcel is about 1 km². Moreover, two additional model parcels of the same size characterized by the maximum biodiversity indicators were observed (16 plots in total). All model parcels were observed according to a unified general

scheme annually, starting from 2016 (Figure 2, see color insert IV).

An environmental monitoring of model parcels system included 3 comprehensive assessments per year. All main characteristics that determine a value of “ecosystem services” were evaluated every year at each model parcel: indicators of aquatic vegetation state, hydrological, hydrochemical, hydrobiological, ornithological, and ichthyological indicators as well. Moreover, vegetation observations using a quadcopter were also carried out. They covered not only model parcels, but also the surrounding vegetation with a total area of more than 35 km².

Results and discussion

At present, results about aquatic vegetation, avifauna and juveniles of phytophilous fish species can already be presented.

Aquatic vegetation. “Old” macrophyte thickets (appeared before the construction of the FPFC began) have a well-defined zonal distribution. They are usually formed by single-layer and multilayer macrophyte groups with a predominance of 2–3-layered vegetation zones. Mostly these thickets are dense and stable. Possibilities for their further expansion have been exhausted.

These thickets are characterized by the largest projective cover degree of the water surfaces (PCW) (far from FPFC – up to 71%, near FPFC – up to 66%). At the same time, submerged vegetation far from FPFC is mainly refer to



Fig. 1. Characteristic macrophyte communities of three identified age gradations (explanations in the text)

A matrix of 14 realized combinations of macrophyte thickets’ age, technogenic impact level and location relative to the FPFC

Table

Factors gradations	A			B		
	a	b	c	a	b	c
1	A1a	A1b	A1c	—	B1b	—
2	A2a	A2b	A2c	—	B2b	—
3	A3a	A3b	A3c	B3a	B3b	B3c

Note: cells indicate corresponding names of the established model parcels; a blank – the hypothetical combination has not been implemented.

V. A. Zhigulsky, V. F. Shuisky, E. Yu. Chebykina, D. V. Zhigulskaya
 "Macrophyte thicket ecosystems in the Neva Bay:
 a response to hydraulic construction impact". P. 88.

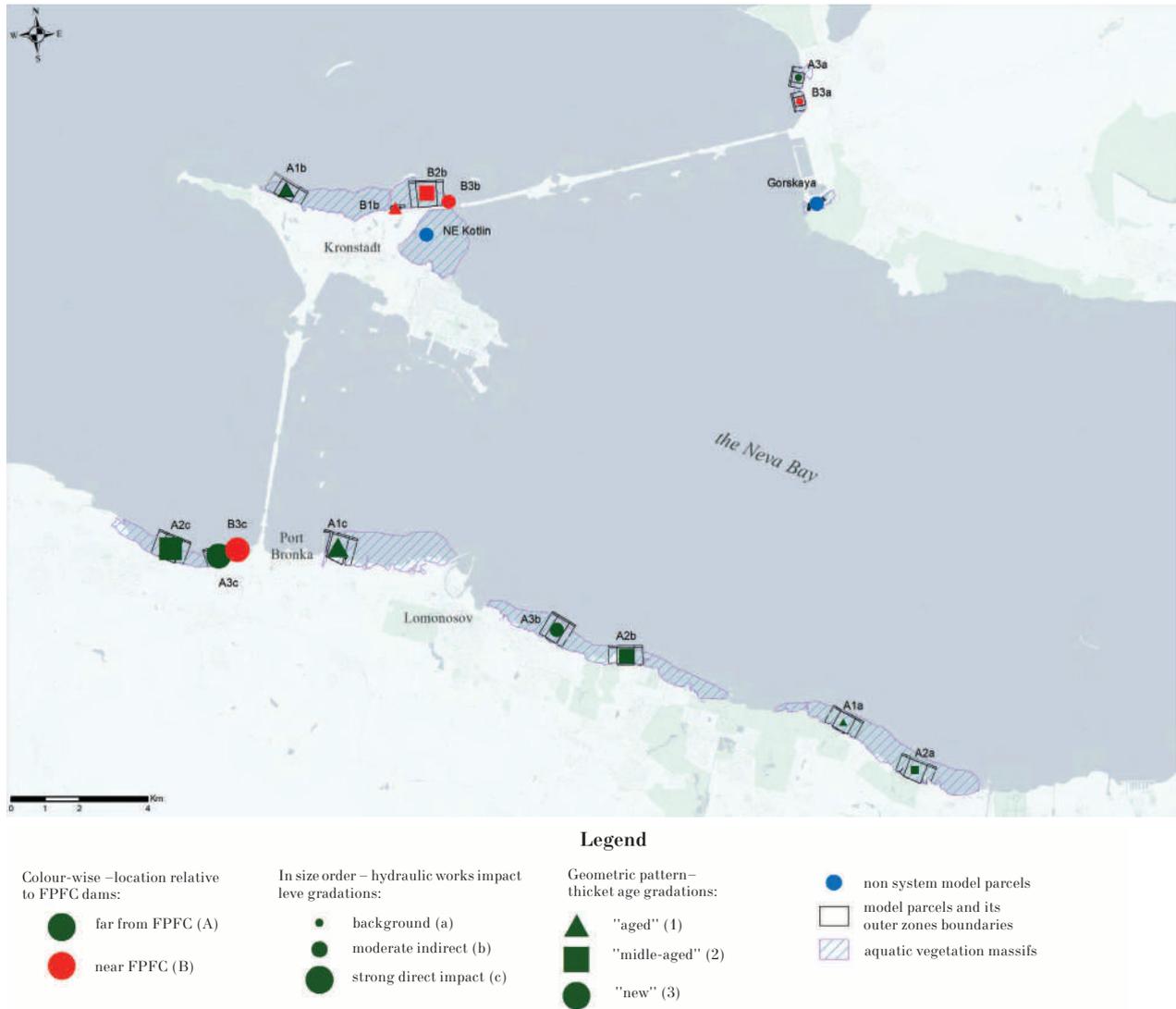


Fig. 2. System of model parcels

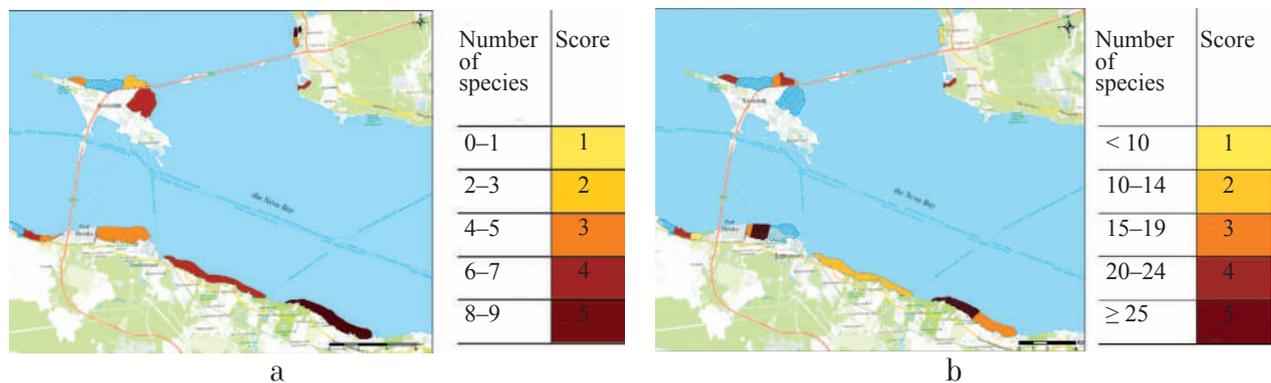


Fig. 3. Examples of macrophyte thickets zoning results according to their fishery (a) and ornithological (b) value: a – a score assessment of the studied spawning areas according to fish juveniles species richness, b – a total number of bird species recorded during spring migrations (scores)

semi-submerged vegetation with floating leaves and occupies little additional area. However, the projective cover degree of the bottom (PCB) near FPFC is supplemented by submerged vegetation significantly, locally exceeding 98%. Additional projective cover degree of the bottom by submerged vegetation ($PCad = PCB - PCW$) far from FPFC is maximum up to 25%, near FPFC – up to 33%.

Projective cover degrees (both PCW and PCB) are the most stable at “old” macrophyte thickets, ranges of projective cover degree temporal changes are minimal over the entire observation period.

It should be also noted their unexpectedly high resistance to anthropogenic impact, apart from a direct mechanical extermination: indicators of projective cover degree do not almost depend on the impact level.

“Middle-aged” macrophyte thickets (formed during the FPFC construction) are perennial equilibrium-succession macrophyte communities with a predominance of simple 1–2-layered vegetation groups. A density and homogeneity of these thickets is less than old macrophyte thickets have, but gradually increases. They continue to expand, occupying the surrounding biotopes.

“Middle-aged” macrophyte thickets at a “background” level of technogenic impact are comparable to “old” thickets (PCW up to 65%) in terms of projective cover degree, however, PCW of “middle-aged” macrophyte thickets are significantly less than “old” ones at “moderate” and “strong” impacts (PCW far from FPFC is not more than 31%).

Submerged vegetation extends rather far beyond spatial limits of semi-submerged vegetation and vegetation with floating leaves and occupies a larger additional area than in case of “old” thickets (PCW and PCB differ more significantly). Additional projective cover degree of the bottom by only submerged vegetation (PCad) for thickets far from FPFC is up to +16%, and near FPFC – up to 73% in some places.

The temporal stability of projective cover degree is much less than in case of “old” thickets, ranges of projective cover degree temporal changes are higher.

“New” (or “young”) macrophyte thickets (formed after the completion of FPFC construction) are perennial pioneer macrophyte communities with a predominance of simple 1-layered vegetation groups. They occupied a small percent of suitable biotopes and actively expand.

They are characterized by the smallest projective cover degree – both by dominants (which are poor here) and total projective cover degree.

Projective cover degree of the water surfaces (PCW) is minimal: it varies from 2 to 12% in thickets far from FPFC and from 2 to 25% in thickets near FPFC.

Projective cover degree by submerged vegetation here is much higher than by semi-submerged vegetation (PCB exceeds PCW 1.5–4 times in thickets far from FPFC and by 2–7 times in thickets near FPFC). Additional projective cover degree of the bottom by only submerged vegetation (PCad) in thickets far from FPFC reaches +29% in some places, and in thickets near FPFC – up to +23%.

The temporal variability of projective cover degree is maximum for “new” thickets (a range of PCB fluctuations is equal to or exceeds average values).

Submerged vegetation is less sensitive than semi-submerged vegetation in case of hydraulic works impact and recovers faster. Moreover, even a weakly expressed direct dependence on the hydraulic impact level is characteristic for “new” thickets.

As a whole, the projective cover degree of the water surface (PCW) is in a clear direct relationship with the thickets age.

The additional projective cover degree of the bottom by submerged vegetation demonstrates an inverse dependence on thickets age and a direct dependence on proximity to FPFC.

Fish juveniles. The most productive spawning areas of phytophilous fish species were revealed, mapped and studied at Strelna, Znamenka, Peterhof, Limuzi, in the mouth part of the bay near Gorskaya station and on Kotlin Island, at thickets on the northwestern coast of Kotlin Island and in the area of the 1st Northern Fort, as well as a macrophyte thicket model parcel of adjoining reservoir in Aleksandrovskaya Bay (example at Figure 3a, see color insert IV).

The greatest impact on fish juveniles relative abundance distribution within thickets model parcels and between different types of massifs can be made by bottom sediments type, the presence of *Nuphar lutea* (L.), *Stratiotes aloides* L. and abundance of filamentous algae (mostly species from the division Chlorophyta) and of filamentous Cyanobacteria in the plant communities, thickets age and projective cover degree, as well as a model parcels location relative to hydraulic works impact degree.

“Old” and “middle-aged” thickets were found to be the most attractive for the spawning of phytophilous fishes. “Middle-aged” thickets are characterized by greater accessibility of an inner part of vegetation massif, give the greatest

spawning surface and rather effective shelters for juveniles. Since “old” thickets are the densest, most fish species (partial except for *Gasterosteus aculeatus* L.) can use only their external border for spawning. “New” thickets, on the contrary, are still not dense enough and can’t provide a sufficient spawning substrate. They are suitable mainly only for juveniles fattening.

A number of regularities have been established for various phytophilous fish species juveniles’ spawning and feeding characteristics distribution over thickets of different age, structure and different levels of anthropogenic impact. The influence of various soil and vegetation characteristics on spawning rates is being studied.

Avifauna. The use of macrophyte thickets by aquatic and semi-aquatic birds during seasonal migrations and nesting was studied (example at Figure 3b, see color insert IV). According to four-year observation results, some conclusions can be characterized by significant interannual differences, spatio-temporal dynamics of bird communities and a probabilistic nature of discrete observations results.

Unfortunately, the Neva Bay is gradually losing its value as a place of one of the most important migratory stopovers for aquatic and semi-aquatic birds on the White Sea – Baltic migration route due to the anthropogenic transformation of the water area and coasts. Birds’ abundance there gradually continues to decline in spring. And probably it has never been very high in autumn in recent decades.

At the same time, spring stopovers are still important for birds migrating to taiga and Arctic Region. Spring stopovers remain more numerous and rich in species than autumn ones.

Littoral macrophyte thickets remain the most important nesting place for many species of semi-aquatic birds in summer. A species diversity of birds breeding in thickets is great, and many rare, protected species are bringing out nestlings in the Neva Bay (including model parcels).

“Old” macrophyte thickets were the most attractive for birds at all stages of the annual cycle (during both the nesting period and seasonal migrations). “Middle-aged” macrophyte thickets were also used by aquatic and semi-aquatic birds and turned out to be quite comparable with the “old” ones according to a number of indicators. Their advantage apparently is a lower density and a presence of open water gaps there. It makes “middle-aged” macrophyte thickets more convenient for birds taking off and landing, as well as getting food. “New” macrophyte thickets almost did not attract aquatic and semi-aquatic birds.

The model parcel adjacent to the port Bronka was significantly inferior to other “old” and “middle-aged” parcels in according with all indicators. The port Bronka impact on birds has a local character, more or less appears in a radius of 200 m from its boundaries, and requires special further researches. No negative impact of the FPFC dam and its economic activities on birds has been identified.

Conclusions

Obtained results summary confirm that “middle-aged” macrophyte thickets (formed during the FPFC construction) are already comparable to the “old” thickets in terms of the level of “ecosystem services” or even prevail them due to the greater variety of conditions they create. This is facilitated to a large extent by the lower density of “middle-aged” macrophyte thickets, the significantly greater angularity of their boundaries, and the abundance of gaps with open water inside the plant massifs. It makes them more convenient both for birds (takeoff and landing, foraging, nesting are facilitated) and for phytophilous fish species (access for spawning and for juveniles within the massif, and not only along its periphery, is facilitated). “New”, recently emerged thickets are a promising resource for macrophyte thickets, but they still almost do not attract aquatic and semi-aquatic birds at this stage of their development. They are also used sporadically by fish and so far only for growing period of juveniles, but not for spawning.

Finally, we noted one more significant result. In fact, a very important precedent has been created – a large, comprehensive scientific and research environmental programme was independently proposed, developed and is being implemented by a non-governmental company with the involvement of leading specialists from specialized government organizations. Hopefully, this will serve as a useful example for environmentally responsible business and attract followers.

The results of the first stage of the programme implementation are presented in detail in the monograph [22].

Our acknowledgments are extended to the experts from leading scientific organizations of St. Petersburg who contributed to research programme implementation: ornithologist V.A. Fedorov (Saint-Petersburg State University), ichthyologist A.A. Uspenskiy (National Research Institute of Lake and River Fisheries), geobotanist M.M. Bulysheva (Gazprom proektirovanie LLC) and specialist

of aerial surveys V.V. Panichev (“Eco-Express-Service” LLC).

References

1. Kudersky L.A., Shurukhin A.S., Popov A.N., Bogdanov D.V., Yakovlev A.S. Fish population of the Neva Bay // Proceedings of the State Research Institute of Lake and River Fisheries. 2007. No. 336. P. 9–35 (in Russian).
2. Alimov A.F., Golubkov S.M. Ecosystem of the Neva River estuary: biodiversity and environmental problems. Moskva: Scientific Press Ltd KMK, 2008. 477 p. (in Russian).
3. Bried J.T., Jog S.K., Dzialowski A.R., Davis C.A. Potential vegetation criteria for identifying reference-quality wetlands in the south-central United States // Wetlands. 2014. V. 34. No. 6. P. 1159–1169. doi: 10.1007/s13157-014-0575-5
4. Kayastha N., Thomas V., Galbraith J., Banskota A. Monitoring wetland change using inter-annual land-sat time-series data // Wetlands. 2012. V. 32. No. 6. P. 1149–1162. doi: 10.1007/s13157-012-0345-1
5. Schummer M.L., Palframan J., McNaughton E., Barney T., Petrie S.A. Comparisons of bird, aquatic macroinvertebrate, and plant communities among dredged ponds and natural wetland habitats at Long Point, Lake Erie, Ontario // Wetlands. 2012. V. 32. No. 5. P. 945–953. doi: 10.1007/s13157-012-0328-2
6. Hierl L.A., Loftin C.S., Longcore J.R., McAuley D.G., Urban D.L. A multivariate assessment of changes in wetland habitat for waterbirds at Moosehorn National Wildlife Refuge, Maine, USA // Wetlands. 2007. V. 27. No. 1. P. 141–152. doi: 10.1672/0277-5212(2007)27[141:AMAOCI]2.0.CO;2
7. Tian K., Liu G., Xiao D., Sun J., Lu M., Huang Y., Lin P. Ecological effects of dam impoundment on closed and half-closed wetlands in China // Wetlands. 2015. V. 35. No. 5. P. 889–898. doi: 10.1007/s13157-015-0679-6
8. Lagos N.A., Paolini P., Jaramillo E., Lovengreen C., Duarte C., Contreras H. Environmental processes, water quality degradation, and decline of waterbird populations in the Rio Cruces wetland, Chile // Wetlands. 2008. V. 28. No. 4. P. 938–950. doi: 10.1672/07-119.1
9. Anteau M.J., Afton A.D. Wetland use and feeding by lesser scaup during spring migration across the upper Midwest, USA // Wetlands. 2009. V. 29. No. 2. P. 704–712. doi: 10.1672/08-157.1
10. Delgado L.E., Marin V.H. Interannual changes in the habitat area of the black-necked swan, *Cygnus Melancoryphus*, in the Carlos Anwandter Sanctuary, Southern Chile: a remote sensing approach // Wetlands. 2013. V. 33. No. 1. P. 91–99. doi: 10.1007/s13157-012-0354-0
11. Noskov G.A., Rymkevich T.A., Gaginskaya A.R., Rychkova A.L. Migration routes and stopovers of waterfowls in the North-West of Russia and urgent measures of their protection // Study of the dynamics of populations of the migratory bird populations and its trends in North-West Russia. V. 9. Sankt-Peterburg: Tuscarora, 2012. P. 60–69 (in Russian).
12. Migration of birds of Northwest Russia. Non-passerines / Eds. G.A. Noskova, T.A. Rymkevich, A.R. Gaginskaya. Sankt-Peterburg: ANO LA “Professional”, 2016. 656 p. (in Russian).
13. Golovan V.I., Ilinskiy I.V., Rezviy S.P., Savinich I.B., Fedorov V.A. Birds of St. Petersburg. Sankt-Peterburg: ZAO Goland, 2011. 256 p. (in Russian).
14. Klevanny K.A., Glyantseva O.V. Influence of St. Petersburg flood protection structures on the regime of the Neva Bay // “Baltic Sea Day” Thesis Collection: Materialy VII Mezhdunarodnogo ekologicheskogo foruma. Sankt-Peterburg: Dialogue Publishing House, 2006. P. 525–532 (in Russian).
15. Andreev P.N., Dvornikov A.Yu., Ryabchenko V.A., Tsepelev V.Yu., Smirnov K.G. Simulation of storm surges in the Neva Bay on the basis of a three-dimensional model of circulation in the conditions of maneuvering by gates of the flood protection barrier // Fundamental and Applied Hydrophysics. 2013. V. 6. No. 4. P. 23–31 (in Russian).
16. Pogrebov V.B., Sagitov R.A., Dmitriev N.V., Usenkov S.M. Nature conservation atlas of the Russian part of the Gulf of Finland. Sankt-Peterburg: Tuskarora, 2006. 56 p. (in Russian).
17. Zhigulsky V.A., Carkova N.S., Bylina T.S., Lавров Ya.B., Solovey N.A., Maksimova E.Yu., Shuisky V.F. The results of ecological monitoring of Luga Bay anthropogenic successions upon the construction of Ust-Luga seaport // Hydrotechnika. 2014. No. 1 (34). P. 72–84 (in Russian).
18. Zhakova L.V., Drozdov V.V., Golubev D.A. Impact of hydraulic engineering construction and soil storage in underwater sea dumps on coastal macrophyte thickets (on the example of the Neva Bay) // Basic concepts of modern shore management. V. 3. Sankt-Peterburg: RGGMU, 2011. P. 138–167 (in Russian).
19. Sukhacheva L.L., Orlova M.I. About application of the results of satellite observations in the eastern in the eastern Gulf of Finland for the assessment of natural and men-mediated impacts onto ecological state of the aquatic area and biotic components of the ecosystem // Regional Ecology. 2014. No. 1–2 (35). P. 62–76 (in Russian).
20. Shitikov V.K., Zinchenko T.D. Multivariate statistical analysis of ecological communities (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 1. P. 5–11 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-1-005-011
21. Adamovich T.A., Domnina E.A., Timonov A.S., Rutman V.V., Ashikhmina T.Ya. Methodological techniques for identifying plant communities based on Earth remote sensing data and field research // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 2. P. 39–43. doi: 10.25750/1995-4301-2019-2-039-043
22. Zhigulsky V.A., Shuisky V.F., Chebykina E.Yu., Fedorov V.A., Panichev V.V., Uspensky A.A., Zhigulskaya D.V., Bylina T.S., Bulysheva M.M., Bulysheva A.M. Macrophyte thicket ecosystems of the Neva Bay. Scientific research program. Results of the first stage. Sankt-Peterburg: Renome, 2020. 304 p. (in Russian). doi: 10.25990/ecoexp.hgvg-pz65

Углеводы в поверхностных водах Карелии и их связь с содержанием биогенных и органических веществ

© 2023. Т. А. Ефремова, м. н. с.,

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
185030, Россия, г. Петрозаводск, пр. А. Невского, д. 50,
e-mail: efremova.nwpi@mail.ru

Обобщены результаты многолетних исследований, посвящённых изучению содержания углеводов в природных водах Республики Карелия с 2011 по 2020 гг. Исследования проведены на 34 водных объектах (29 озёрах и 5 реках) в разные гидрологические сезоны. Представленная выборка водных объектов отражает практически все типы поверхностных вод гумидной зоны по уровню трофности и гумусности. В результате исследований было установлено, что концентрация углеводов варьирует в очень широких пределах от 0,7 до 53,1 мг/л (в среднем 3,3 мг/л). Доля их от общего содержания органического вещества в среднем составляет 16%. Выявлено, что содержание и распределение углеводов в поверхностных водах зависит как от природных факторов (уровень трофности и гумусности водоёма), так и антропогенных. К последним относятся антропогенное эвтрофирование, влияние форелевых хозяйств, сброс сточных вод целлюлозно-бумажного комбината, попадание фильтрационных вод полигонов захоронения отходов, городские сточные воды.

Все исследуемые водные объекты по критерию превышения предельно допустимых концентраций были разделены на две группы: загрязнённые и незагрязнённые. Установлено, что концентрация углеводов в загрязнённых объектах в среднем в 1,4 раза выше, чем в незагрязнённых. Содержание углеводов увеличивается совместно с такими химическими показателями как биохимическое потребление кислорода на 5 сутки, химическое потребление кислорода, перманганатная окисляемость, содержание хлорофилла *a*, минерального и общего фосфора, аммония. В особенности эти связи ярко выражены в загрязнённых водных объектах, для которых отмечаются самые высокие значения коэффициента корреляции между вышеперечисленными параметрами.

Ключевые слова: углеводы, органическое вещество, биогенные элементы, загрязнение, поверхностные воды.

Carbohydrates in surface waters and its relation to the nutrients and organic matter content

© 2023. Т. А. Efremova ORCID: 0000-0003-1074-1083*

Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre
of the Russian Academy of Sciences,
50, A. Nevskogo St., Petrozavodsk, Russia, 185030,
e-mail: efremova.nwpi@mail.ru

The results of a long-term research of the content of carbohydrates in natural waters of Republic of Karelia (Russia) from 2011 to 2020 are summarized. In total, 34 water bodies (29 lakes and 5 rivers) were studied in different hydrological seasons. The presented sample of water bodies captures almost all types of surface waters in the humid zone in terms of trophicity and humus content. It was found that the carbohydrates concentration varies widely from 0.7 to 53.1 mg/L (average 3.3 mg/L) and its share of total organic matter averages 16%. It was revealed that the content and distribution of carbohydrates in surface waters depends both on natural (the level of trophicity and humus content in the reservoir) and anthropogenic factors (eutrophication, trout farms, industrial wastewater discharge, seepage waters of solid waste landfills, communal wastewater). In addition, all the studied water bodies were categorized into two groups according to the water pollution degree: contaminated and uncontaminated. It was revealed that the concentration of carbohydrates in contaminated water bodies of Karelia is on average 1.4 times higher than in uncontaminated ones. In addition, the content of carbohydrates increases together with such chemical parameters as 5-day biochemical oxygen demand (BOD_5), chemical oxygen demand (COD_{Cr}), permanganate oxygen demand (COD_{Mn}), chlorophyll *a*, mineral and total phosphorus (P_{min} and P_{total} relatively) and ammonium ($N-NH_4^+$). In particular, these relations are pronounced in contaminated water bodies, where the highest values of the correlation coefficient between the above parameters are noted. The content of carbohydrates in surface waters is a complex indicator of both organic and biogenic water pollution.

Keywords: carbohydrates, organic matter, nutrients, contamination, surface waters.

Органическое вещество (ОВ) играет важную роль в водных экосистемах. Оно является пищей для живых организмов, способствует миграции химических элементов в водной среде и во многом определяет качество воды. В водных экосистемах фитопланктон и микрофитобентос относятся к основным продуцентам ОВ, и именно этой группе организмов принадлежит доминирующая роль в формировании «глобальной первичной продукции» [1]. Как известно, состав ОВ не постоянен и может изменяться в зависимости от интенсивности первичного продуцирования, преобразования ОВ вторичными продуцентами, поступления с водосборной территории и степени антропогенного влияния. Но влияние этих процессов на экосистему легче проследить и оценить по индивидуальным химическим компонентам ОВ.

В зависимости от источника происхождения ОВ природных вод делят на автохтонное и аллохтонное. Главным компонентом автохтонного ОВ являются углеводы, аллохтонного – гумусовые вещества [2]. Углеводы являются основным продуктом первичного продуцирования ОВ, которые в дальнейшем преобразуются в другие соединения в результате клеточного метаболизма [3]. Они также оказывают влияние на круговорот ОВ в водоёмах и отражают функционирование водных экосистем [4]. Паводковые воды и атмосферные осадки вымывают углеводы из почв, которые представляют собой мощный аккумулятор органических соединений, образующийся в результате биохимического разложения растительных и животных организмов [5]. Углеводы также поступают со сточными водами предприятий пищевой и целлюлозно-бумажной промышленности [6].

В литературе имеются обширные сведения о содержании, распределении и трансформации углеводов в чистых природных водах [7–9] и крайне ограниченные в загрязнённых водах [6, 10].

Целью данной работы являлось выявление закономерностей пространственного распределения углеводов в поверхностных водах Карелии, а также установление связей между их содержанием и концентрациями органических и биогенных веществ в воде, в том числе отдельно в загрязнённых и не загрязнённых водных объектах.

Объекты и методы исследования

В различные гидрологические сезоны с 2011 по 2020 гг. было исследовано 34 водных

объекта Карелии (29 озёр и 5 рек). Всего было проанализировано 198 проб (*n*). Пробы отбирались с поверхностного и придонного горизонтов в различные гидрологические сезоны. Объекты исследования выбирались на основе архивной гидрохимической информации по более чем 800 водным объектам Карелии. Их ранжировали по геохимической классификации П.А. Лозовика по щёлочности, гумусности и трофности [11] с использованием автоматизированной системы обработки гидрохимической информации [12]. Водоёмы и водотоки для исследования выбирались на основе имеющейся информации таким образом, чтобы они наиболее полно отражали геохимические особенности поверхностных вод Карелии и при этом имели возможность подъезда на автотранспорте для проведения полевых работ.

Определение валового содержания углеводов проводилось по фотометрической методике с L-триптофановым реактивом, адаптированной к поверхностным водам с повышенным содержанием гумусовых веществ в воде [13]. Другие химические показатели анализировали по методикам, принятым в гидрохимической практике [13]: аммоний (NH_4^+) – фотометрическим индофенольным методом; нитраты (NO_3^-) – восстановлением на кадмиевом редуторе и с последующим анализом нитритов с сульфаниламидом и N-(1-нафтил)-этилендиамина дигидрохлоридом; азот общий ($\text{N}_{\text{общ.}}$) – персульфатным окислением в щелочной среде; фосфор общий ($\text{P}_{\text{общ.}}$) – персульфатным окислением и последующим анализом фосфора минерального ($\text{P}_{\text{мин.}}$); $\text{P}_{\text{мин.}}$ – фотометрическим методом Морфи и Райли; перманганатная окисляемость (ПО) – в кислой среде по Кубелю; химическое потребление кислорода (ХПК) – титриметрическим методом; биохимическое потребление кислорода на 5 суток (БПК₅) – скляночным методом; хлорофилл *a* – спектрофотометрическим методом.

Доля углеводов от общего содержания ОВ (по ХПК) рассчитывается следующим образом:

$$\% \text{ от ОВ} = \frac{C \cdot 1,07}{\text{ХПК}} \cdot 100,$$

где 1,07 – коэффициент пересчёта концентрации глюкозы на её ХПК; *C* – концентрация углеводов, мгО/л.

Все исследованные водные объекты разделялись на две группы: загрязнённые и незагрязнённые. Степень загрязнения исследуемых водных объектов была оценена

по ПДК для рыбохозяйственных водоёмов, утверждённых Приказом Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552, по следующим показателям: БПК₅, Р_{мин.}, NO₃⁻, NO₂⁻, NH₄⁺. ПДК для ПО взято для водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (ГН 2.1.5.1315-03).

Для статистической обработки данных использовалось свободно распространяемое программное обеспечение Sofa statistics 1.4.6 (<http://www.sofastatistics.com>). Данные химического анализа имели лог-нормальное распределение, поэтому для применения методов параметрической статистики они были приведены к нормальному виду путём логарифмирования. Для поиска взаимосвязей между показателями использовался параметрический тест Пирсона. Для определения статистически значимой разницы в содержании углеводов в загрязнённых и не загрязнённых водах был применён независимый *t*-test. Для установления статистически значимой разницы в содержании углеводов в разнотипных по уровню трофии и гумусности водных объектах использовался тест ANOVA. В статистических тестах использовался уровень значимости 0,05.

Результаты и обсуждение

По результатам данного исследования концентрация углеводов в поверхностных водах Карелии варьирует в очень широких пределах: от 0,7 до 53,1 мг/л, и в среднем составляет 3,3 мг/л. При этом их доля в общем содержании ОБ в среднем составляет 16%. Содержание ОБ в природных водах – это

интегральный показатель, величина которого зависит от многих факторов: трофности и гумусности вод, соотношения скоростей продукционно-деструкционных процессов, величины речного и антропогенного стоков. Поэтому такая высокая изменчивость содержания углеводов в одной климатической зоне обусловлена многими факторами, прежде всего, высокой вариабельностью содержания самого ОБ. Так, содержание его в исследуемых водах Карелии по косвенным показателям варьирует в диапазоне: ХПК – 7,6–529,3, мгО/л (в среднем 27,5 мгО/л), ПО – 2,1–202,2 (в среднем 20,5 мгО/л), БПК₅ – 0,1–37,9 мгО₂/л (в среднем 1,7 мгО₂/л). По критерию ПДК из 34 обследованных водных объектов Карелии 5 было отнесено к загрязнённым (табл. 1).

Так, максимальное содержание углеводов (53,1 мг/л) было отмечено в р. Сельгская в летний период 2020 г., принимающей сток с полигона захоронения активных илов станции биологической очистки сточных вод г. Петрозаводска (рис. 1). Кроме того, фильтрационные воды полигона активных илов с высоким значением рН, дренирующие заболоченную территорию, способствуют вымыванию гумусовых веществ из почвы и торфа и, как следствие, усиленному поступлению ОБ в реку [14].

Другим выявленным антропогенным источником загрязнения являются городские стоки. Было отмечено, что повышенные концентрации углеводов, в особенности в осенний сезон 2020 г. (7,3 мг/л), наблюдались в р. Неглинка, протекающей в городской черте г. Петрозаводска (рис. 1). Согласно государственным докладом о состоянии окружающей среды

Таблица 1 / Table 1

Кратность превышения ПДК по некоторым показателям содержания биогенных и органических веществ в загрязнённых водных объектах Карелии (среднее значение)
The multiplicity of exceeding the maximum permissible concentrations (MPC) for some nutrient and organic indicators in polluted water bodies of Karelia (average value)

Объекты Object	ПО COD _{Mn}	БПК ₅ BOD ₅	Р _{мин.} P _{min}	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺
Кондопожская губа Kondopozhskaya Bay	2	1,1	–*	–	–	–
Оз. Крошнозеро Kroshnozzero Lake	3	1,1	–	–	–	–
Оз. Святозеро Svyatozero Lake	1,5	–	–	–	–	2
Р. Сельгская Selgskaya River	30	4	4	5	–	–
Р. Неглинка Neglinka River	5	1,1	–	1,1	–	–

Примечание: * – превышений по ПДК не выявлено.
Note: * – MPC exceedance undetected.

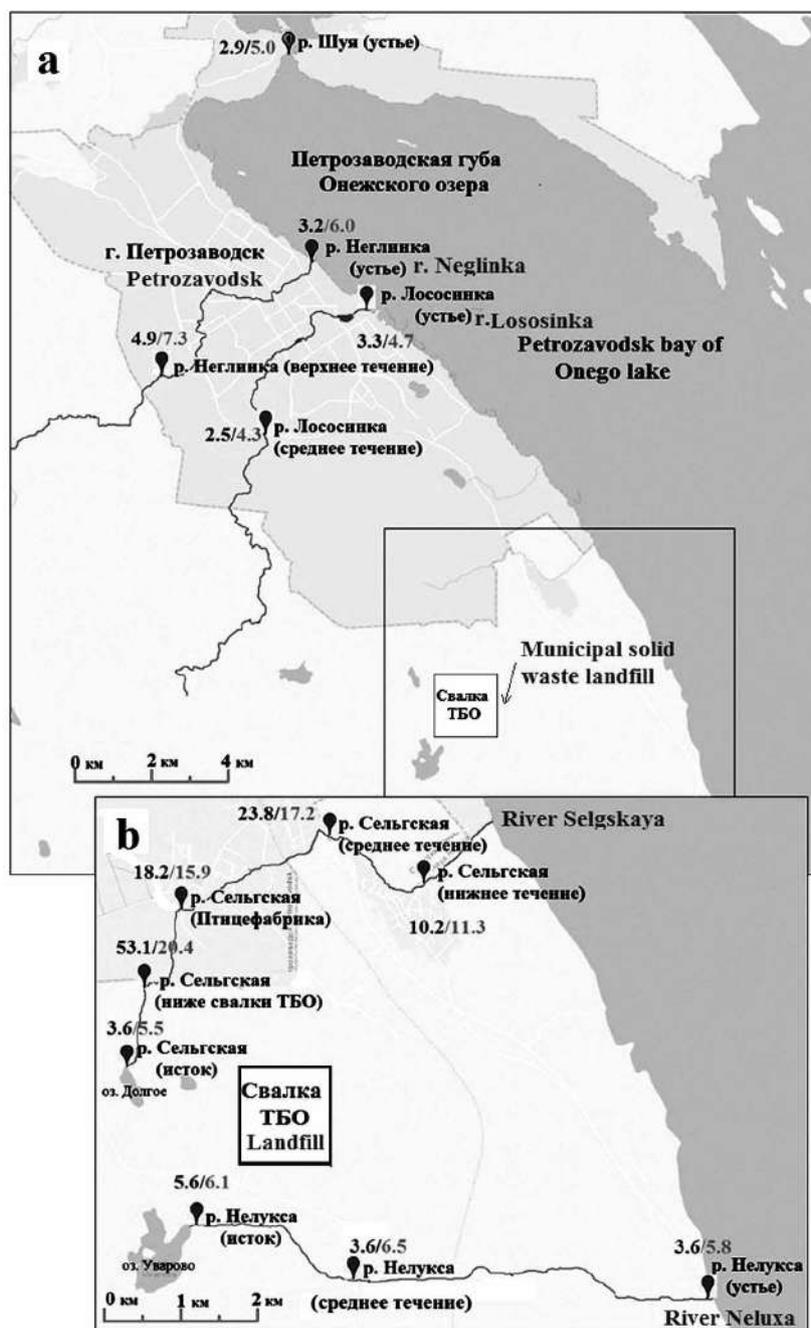


Рис. 1. Пространственное распределение углеводов в реках, подверженных антропогенному воздействию (а – городские стоки; б – фильтрационные воды полигонов захоронения отходов) в летний/осенний сезоны 2020 г.
 Fig. 1. Spatial distribution of carbohydrates in rivers exposed to anthropogenic impact (a – communal wastewater; b – seepage waters of solid waste landfills) in the summer/autumn of 2020

Республики Карелии, в реку поступает большое количество нефтепродуктов (19,26 ПДК) и легкоминерализуемой органики (БПК₅ – 2,5 ПДК) [15].

Повышенные концентрации углеводов были отмечены и в вершинной части Кондопожской губы Онежского озера в месте сброса сточных вод целлюлозно-бумажного комбината (ЦБК) (5,5 мг/л), а также поблизости от форелевых хозяйств в средней части губы (до

5,6 мг/л), где расположены одни из крупнейших форелевых ферм России [16].

Необходимо отметить, что повышение концентраций углеводов характерно для зимне-весеннего периода, когда водообмен губы с озером ограничен ледоставом, а весной – термобаром [17]. Среднесезонные концентрации углеводов по разрезу Кондопожской губы (от центральной её части к внешней) находились в пределах от 1,9 до 3,7 мг/л.

Таблица 2 / Table 2

Средние, максимальные и минимальные концентрации углеводов в загрязнённых и незагрязнённых поверхностных водах Карелии
Average, maximum and minimum concentrations of carbohydrates in contaminated and uncontaminated waters of Karelia

Показатель Parameters	Углеводы, мг/л / Carbohydrates, mg/L	
	незагрязнённые uncontaminated	загрязнённые contaminated
Среднее значение / Average value	3,1 ^{+0,20*} _{-0,22}	4,2 ^{+1,13} _{-1,53}
min	0,80	0,70
max	7,3	53,1
Количество проб, N / Number of samples, N	157	37

Примечание / Note: * – доверительный интервал / confidence interval.

Таблица 3 / Table 3

Классификация исследуемых водных объектов Карелии по гумусности и трофности
Classification of water bodies of Karelia by water body trophicity and humus content

Объекты Objects	Трофность Water body trophicity	Гумусность Humus content
Озёра Урозера, Мунозеро, Чучьярви, Уросозера, центральный плёс Онежского оз. / Lakes: Urozero, Munozero, Chuchyarvi, Urosozero; central part of the Onezhskoe Lake	олиго- oligo-	низко- low-
Озёра Сандал, Лижменское, Каменное, губа Камалахта Lakes: Sandal, Lizhmenskoe, Kamennoe; Kamalakhta Bay	олиго- oligo-	мезо- meso-
Озёра Петусьярви, Вегарусьярви, Иля-Кялькянярви Lakes: Petusyarvi, Vegarusyarvi, Iya-Kyalkyanyarvi	олиго- oligo-	высоко- high-
Озёра Вендюрское, Валгомозера Lakes: Vendyurskoe, Valgomozero	мезо- meso-	низко- low-
Озёра Ладожское, Яндомозера, Падмозера, Габозера, Сямозера, Петрозаводская губа Онежского оз. / Lakes: Ladozhskoe, Yandomozero, Padmозero, Gabozero, Syamozero; Petrozavodskaya Bay of the Onezhskoe Lake	мезо- meso-	мезо- meso-
Озёра Яглярви, Кивач, Кивиярви, Луглярви, Салоньярви, Шотозера Lakes: Yaglyarvi, Kivach, Kiviyarvi, Luglyarvi, Salonyarvi, Shotozero	мезо- meso-	высоко- high-
р. Лососинка (устье) Lososinka River (mouth)	эв- eu-	мезо- meso-
Озёра Палват, Н. Ротчезера, Кутижозера, реки Шуя (устье), Нелукса (устье) Lakes: Palvat, N. Rotchezero, Kutizhozero; rivers: Shuya (mouth), Neluksa (mouth)	эв- eu-	высоко- high-

Полученные результаты позволяют рассматривать углеводы в качестве индикаторов при «цветении» воды в эвтрофных озёрах. Например, в оз. Святозеро в летний сезон 2012 г. во время активного развития фитопланктона концентрация углеводов достигала 11,0 мг/л, однако в другие сезоны года их содержание в среднем составляло 4,0 мг/л. Повышенные температуры воды летом при относительно высоком содержании биогенных веществ, в первую очередь, соединений фосфора и азота, способствуют интенсивному развитию фитопланктона. Если вспомнить уравнение фотосинтеза, в котором заключается основа существования

жизни на Земле, то углеводы являются первыми их продуктами.

В результате статистического анализа (*t*-tests-independent) было установлено, что незагрязнённые и загрязнённые водные объекты достоверно различаются по содержанию углеводов, при этом в водоёмах, подверженных антропогенному воздействию, их содержание выше в среднем в 1,4 раза (табл. 2). Таким образом, мониторинг содержания углеводов – как одного из основных биохимических компонентов ОБ [10], позволяет судить о происхождении и пищевой ценности ОБ для высших трофических уровней данной экосистемы.

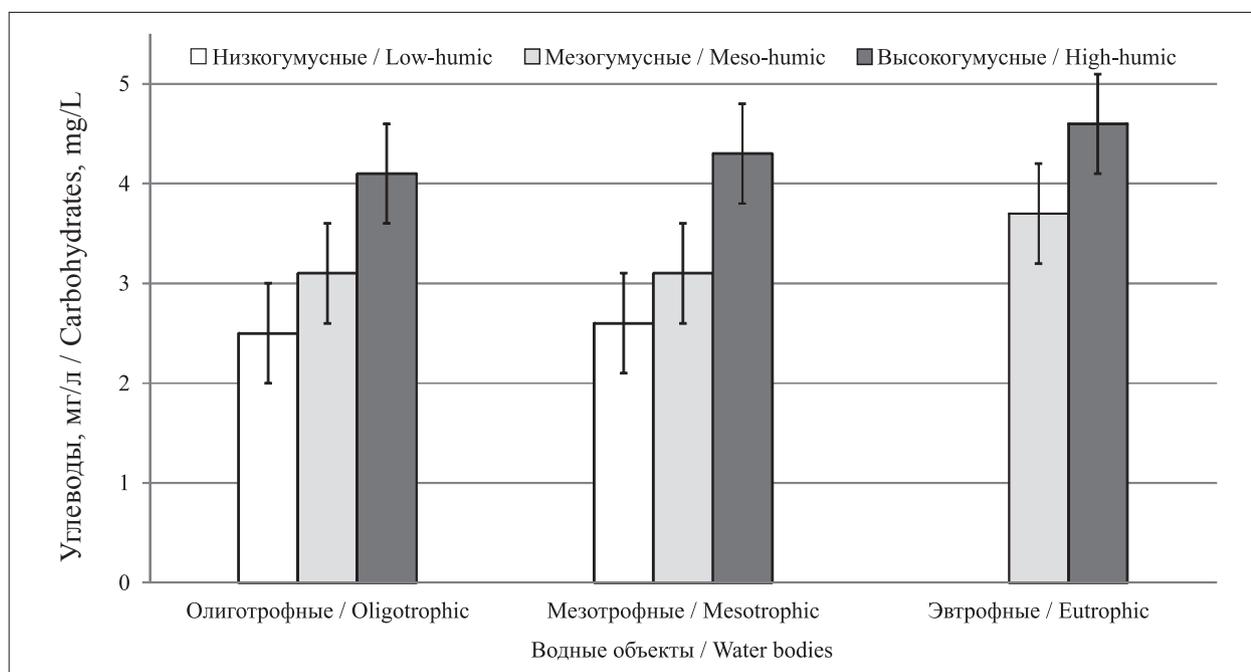


Рис. 2. Содержание углеводов в зависимости от уровня трофности и гумусности в водных объектах Карелии с 2011 по 2020 гг. (размах показывает доверительный интервал с вероятностью 0,95)
Fig. 2. Content of carbohydrates depending on the level of water body trophicity and humus content in water bodies of Karelia from 2011 to 2020 (range shows confidence interval with a probability of 0.95)

В то же время в природных водах, не подверженных антропогенному загрязнению, был выявлен ряд особенностей в распределении углеводов. Основываясь на полученной в рамках данного исследования информации, объекты были разделены по гумусности и трофности на восемь групп (табл. 3) [11].

Выявлено, что содержание углеводов близкое в олиго- и мезотрофных водоёмах и значительно выше в эвтрофной группе озёр ($p < 0,05$, тест ANOVA) (рис. 2). Соответственно их содержание отражает продуктивность водного объекта. При увеличении гумусности воды содержание углеводов также увеличивается (рис. 2). Это объясняется тем, что гумусовые вещества – это продукты конденсации лигнина, углеводов, белков и других веществ [5].

Установлены статистически значимые связи содержания углеводов с косвенными показателями содержания ОВ – ПО и ХПК – в исследуемых водных объектах (табл. 4). Как известно, ХПК является интегральным показателем ОВ, характеризующим суммарное его содержание. Углеводы являются преобладающим компонентом автохтонного ОВ [18], соответственно их связь с общим содержанием ОВ в природных водах вполне закономерна (табл. 4).

Что касается легкоокисляемого ОВ, то в водах, не подверженных антропогенному воздействию, не было обнаружено связи

содержания углеводов с величиной БПК₅ ($p > 0,05$). Сравнительно низкие значения (0,3–2,1 мгО₂/л) БПК₅ в незагрязнённых водах говорят о невысокой их продуктивности. И, напротив, в загрязнённых и эвтрофных водоёмах, где происходит активное продуцирование ОВ с образованием большого количества легкоокисляемого ОВ, связь БПК₅ с содержанием углеводов становится значимой, что уже было показано ранее (рис. 3). Аналогичная связь была отмечена и для углеводов с хлорофиллом *a* (табл. 4).

Выявлена связь между содержанием углеводов и концентрациями Р_{мин.}, Р_{общ.} и N-NH₄⁺ в обеих группах озёр (табл. 4), при этом связь содержания углеводов с концентрациями нитратов и нитритов проявляется только в загрязнённых водах. По-видимому, поступление биогенных элементов, в первую очередь фосфора, со сточными водами или с речным стоком, как и в случае с БПК₅, приводит к увеличению первичной продукции, и, в свою очередь, – к возрастанию содержания углеводов. В чистых природных водах Карелии содержание нитритов характеризуется очень низкой вариабельностью (< 0,001–0,029 мгN/л, в среднем 0,001 мгN/л), в связи с этим их связи с содержанием углеводов не выявлено (табл. 4).

Сравнивая значения коэффициентов корреляции (*R*) для загрязнённых и не загрязнённых объектов можно заключить, что

Таблица 4 / Table 4

Корреляционная матрица между концентрацией углеводов и содержанием биогенных и органических веществ в обследованных водных объектах Карелии
Correlation matrix between carbohydrates and nutrients and organic matter in water bodies of Karelia

Показатель Parameter	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-NO ₂ ⁻	P _{общ.} P _{total}	P _{мин.} P _{min}	ПО COD _{Mn}	ХПК [*] COD _{Cr}	БПК ₅ BOD ₅	Хлоро- филл <i>a</i> Chloro- phyll <i>a</i>
Углеводы в чистых природных водах Carbohydrates in natural water	<i>p</i> = 2,52e⁻³ <i>R</i> = 0,27 <i>N</i> = 113	<i>p</i> = 0,09 <i>R</i> = -0,16 <i>N</i> = 117	<i>p</i> = 0,47 <i>R</i> = -0,08 <i>N</i> = 74	<i>p</i> = 1,64e⁻⁸ <i>R</i> = 0,43 <i>N</i> = 154	<i>p</i> = 1,49e⁻⁸ <i>R</i> = 0,51 <i>N</i> = 111	<i>p</i> = 7,69e⁻¹² <i>R</i> = 0,64 <i>N</i> = 91	<i>p</i> = 5,99e⁻¹⁵ <i>R</i> = 0,56 <i>N</i> = 155	<i>p</i> = 0,96 <i>R</i> = 0,01 <i>N</i> = 103	<i>p</i> = 0,20 <i>R</i> = 0,17 <i>N</i> = 59
Углеводы в загрязнённых водах Carbohydrates in contaminated waters	<i>p</i> = 8,33e⁻⁷ <i>R</i> = 0,80 <i>N</i> = 26	<i>p</i> = 0,02 <i>R</i> = 0,45 <i>N</i> = 26	<i>p</i> = 2,83e⁻⁷ <i>R</i> = 0,86 <i>N</i> = 21	<i>p</i> = 7,77e⁻¹¹ <i>R</i> = 0,91 <i>N</i> = 27	<i>p</i> = 8,23e⁻⁴ <i>R</i> = 0,69 <i>N</i> = 21	<i>p</i> = 1,64e⁻⁷ <i>R</i> = 0,87 <i>N</i> = 22	<i>p</i> = 1,64e⁻⁹ <i>R</i> = 0,90 <i>N</i> = 24	<i>p</i> = 3,66e⁻⁸ <i>R</i> = 0,91 <i>N</i> = 20	<i>p</i> = 5,05e⁻³ <i>R</i> = 0,78 <i>N</i> = 11

Примечание: жирным выделены статистически значимые связи (*p* < 0,05); *R* – коэффициент корреляции; *N* – количество проб.

Note: statistically significant relationships are highlight in bold (*p* < 0.05); *R* – correlation coefficient; *N* – number of samples.

в загрязнённых водных объектах эта связь проявляется ярче, по всей видимости, за счёт большего размаха колебаний рассматриваемых показателей в загрязнённых водах. Положительное значение коэффициента корреляции для всех выявленных зависимостей говорит о том, что содержание углеводов возрастает с увеличением концентраций в воде биогенных и органических веществ. Полученные коэффициенты корреляции (*R*) были классифицированы по шкале Чедокка. А именно, в чистых природных водах Карелии они характеризовались как: отсутствие корреляции содержания углеводов – с БПК₅ и нитритами; слабая связь – с аммонием, нитратами и хлорофиллом *a*; умеренная – с общим и минеральным фосфором; заметная – с ПО и ХПК. В загрязнённых природных водах Карелии: умеренная – с нитратами; высокая – с хлорофиллом *a*, ХПК, ПО, фосфором минеральным, нитритами; весьма высокая – с БПК₅ и общим фосфором.

Заключение

Содержание и распределение углеводов в поверхностных водах зависит как от природных факторов (уровень трофии и гумусность водоёма), так и антропогенных, таких как антропогенное эвтрофирование, влияние форелевых хозяйств, сброс сточных вод ЦБК,

попадание фильтрационных вод полигонов захоронения отходов и городские стоки.

Установлено, что содержание углеводов увеличивается совместно с такими показателями качества воды как БПК₅, ХПК, ПО, хлорофилл *a*, P_{мин.}, P_{общ.} и NH₄⁺. В особенности эти связи ярко проявляются в загрязнённых водных объектах, где отмечаются самые высокие значения коэффициента корреляции между ними. Выявлено, что концентрация углеводов в загрязнённых водоёмах Карелии в 1,4 раза выше, чем в незагрязнённых. Таким образом, углеводы, являясь одним из основных компонентов автохтонного ОВ, могут отражать, как органическое, так и биогенное загрязнение воды, а их содержание в воде выступает в качестве комплексного индикатора этих видов загрязнений.

Статья подготовлена при финансовом обеспечении федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (ИВПС КарНЦ РАН). Исследования выполнены на научном оборудовании Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук».

Литература

1. Раймонд Д. Планктон и продуктивность океана. М.: Лёгкая и пищевая промышленность, 1983. С. 214–229.

2. Ефремова Т.А., Зобкова М.В. Содержание, распределение и соотношение основных компонентов органического вещества в воде Онежского озера // Труды Карельского научного центра РАН. Серия «Лимнология и океанология». 2019. № 9. С. 60–75.

3. Mykkestad S.M., Borsheim K.V. Dynamic of carbohydrates in the Norwegian Sea inferred from monthly profiles collected during 3 years at 66°N, 2°E // *Mar. Chem.* 2007. V. 107. No. 4. P. 475–485.

4. Вернадский В.И. Химическое строение биосферы Земли и её окружения. М.: Наука, 1965. 326 с.

5. Орлов Д.С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: МГУ, 1990. 325 с.

6. Шаова Л.Г. Самоочищение природных вод от редуцирующих сахаров: Диссертация канд. хим. наук. Новочеркасск, 1971. 186 с.

7. He Z., Wang Q., Yang G.P., Gao X.C., Wu G.W. Spatiotemporal variation characteristics and related affecting factors of dissolved carbohydrates in the East China Sea // *Continental Shelf Research*. 2015. V. 108. P. 12–24.

8. Беляева А.Н. Молекулярный состав органического вещества в океане // Новые идеи в океанологии. М.: Наука. 2004. Т. 2. С. 325–350.

9. Линник П.Н., Жежеря В.А., Линник Р.П. Роль нейтральной фракции растворенных органических веществ в миграции металлов в поверхностных водах: Содержание и источники углеводов в разнотипных водных объектах // *Экологическая химия*. 2017. Т. 26. № 4. С. 214–222.

10. Агатова А.И. Органическое вещество в морях России. М.: Издательство ВНИРО, 2017. 260 с.

11. Лозовик П.А. Геохимическая классификация поверхностных вод гумидной зоны на основе их кислотно-основного равновесия // *Водные ресурсы*. 2013. Т. 40. № 6. С. 583–592.

12. Зобков М.Б. Автоматизированная информационная система «Обработка гидрохимической информации и оценка состояния водных объектов» (АИС «ОГХИ») // Авторское свидетельство на программу для ЭВМ: Свидетельство о государственной регистрации: 2010612351. Дата публикации: 31.04.2010.

13. Аналитические, кинетические и расчётные методы в гидрохимической практике / Под ред. П.А. Лозовика, Н.А. Ефременко. СПб.: Нестор-История, 2017. 272 с.

14. Зобков М.Б., Зобкова М.В., Сабылина А.В., Ефремова Т.А. Оценка воздействия фильтрационных вод полигонов захоронения твёрдых бытовых отходов и активных илов на качество воды малых рек гумидной зоны // *Теоретическая и прикладная экология*. 2021. № 4. С. 119–126.

15. Государственный доклад о состоянии окружающей среды республики Карелия в 2018 г. Петрозаводск: Министерство по природопользованию и экологии республики Карелия, 2018. 283 с.

16. Galakhina N.E., Zobkov M.B., Zobkova M.V. Current chemistry of Lake Onego and its spatial and temporal

changes for the last three decades with special reference to nutrient concentrations // *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*. 2022. V. 17. Article No. 100619.

17. Лозовик П.А., Зобков М.Б., Бородулина Г.С., Токарев И.В. Оценка внешнего водообмена заливов озёр по химическим показателям воды // *Водные ресурсы*. 2019. Т. 46. № 1. С. 91–101.

18. Зобкова М.В., Ефремова Т.А., Лозовик П.А., Сабылина А.В. Органическое вещество и его компоненты в поверхностных водах гумидной зоны // *Успехи современного естествознания*. 2015. № 12. С. 115–120.

References

1. Raymond D. Plankton and ocean productivity. Moskva: Legkaya i pishchevaya promyshlennost, 1983. P. 214–229 (in Russian).

2. Efremova T.A., Zobkova M.V. Content, distribution and ratio of the main components of organic matter in the water of Onego Lake // *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN. Limnology and Oceanology Series*. 2019. No. 9. P. 60–75 (in Russian). doi: 10.17076/lim1017

3. Mykkestad S.M., Borsheim K.V. Dynamic of carbohydrates in the Norwegian Sea inferred from monthly profiles collected during 3 years at 66°N, 2°E // *Mar. Chem.* 2007. V. 107. No. 4. P. 475–485. doi: 10.1016/j.marchem.2007.09.002

4. Vernadskiy V.I. The chemical structure of the Earth's biosphere and its surroundings. Moskva: Nauka, 1965. 326 p. (in Russian).

5. Orlov D.S. Soil humic acids and the general theory of humification. Moskva: MGU, 1990. 325 p. (in Russian).

6. Shaova L.G. Self-purification of natural waters from reducing sugars: Dissertation of candidate of chemical sciences. Novochoerkassk, 1971. 186 p. (in Russian).

7. He Z., Wang Q., Yang G.P., Gao X.C., Wu G.W. Spatiotemporal variation characteristics and related affecting factors of dissolved carbohydrates in the East China Sea // *Continental Shelf Research*. 2015. V. 108. P. 12–24. doi: 10.1016/j.csr.2015.08.002

8. Belyaeva A.N. Molecular composition of organic matter in the ocean // *New Ideas in Oceanology*. Moskva: Nauka, 2004. V. 2. P. 325–350 (in Russian).

9. Linnik P.N., Zhezherya V.A., Linnik R.P. The role of the neutral fraction of dissolved organic matters in the migration of metals in surface waters: Content and sources of carbohydrates in different types of water bodies // *Ekologicheskaya khimiya*. 2017. V. 26. No. 4. P. 214–222 (in Russian).

10. Agatova A.I. Organic matter in the seas of Russia. Moskva: Izdatel'stvo VNIRO, 2017. 260 p. (in Russian).

11. Lozovik P.A. Geochemical classification of surface waters of the humid zone based on their acid-base balance // *Vodnye Resursy*. 2013. V. 40. No. 6. P. 583–592 (in Russian).

12. Zobkov M.B. Copyright certificate for the computer program: Automatic information system Hydrochemical data processing and water objects condition assessment (AIS "OGHI"). Certificate of registration: 2010612351. Date of publication: 31.04.2010 (in Russian).

13. Analytical, kinetic and calculation methods in hydrochemical practice. Sankt Peterburg: Nestor-Istoriya, 2017. 272 p. (in Russian).

14. Zobkov M.B., Zobkova M.V., Sabylina A.V., Efremova T.A. Assessing the impact of seepage waters of landfills for solid domestic waste and activated sludge on the water quality of small rivers in the humid zone // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 4. P. 119–126 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-4-119-126

15. State report on the state of the environment of the Republic of Karelia in 2018. Petrozavodsk: Ministerstvo po

prirrodopolzovaniyu i ekologii respubliky Kareliya, 2018. 283 p. (in Russian).

16. Galakhina N.E., Zobkov M.B., Zobkova M.V. Current chemistry of Lake Onego and its spatial and temporal changes for the last three decades with special reference to nutrient concentrations // Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management. 2022. V. 17. Article No. 100619. doi: 10.1016/j.enmm.2021.100619

17. Lozovik P.A., Zobkov M.B., Borodulina G.S., Tokarev I.V. Evaluation of external water exchange in lake bays by chemical indicators of water // Vodnye resursy. 2019. V. 46. No. 1. P. 91–101 (in Russian). doi: 10.31857/S0321-059646191-101

18. Zobkova M.V., Efremova T.A., Lozovik P.A., Sabylina A.V. Organic matter and its components in surface waters humid zone // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. 2015. No. 12. P. 115–120 (in Russian).

Оценка экологического состояния реки Сояна в зоне возможного воздействия алмазоносного месторождения

© 2023. Н. В. Климовский, к. г. н., с. н. с.,
А. П. Новоселов, д. б. н., г. н. с., Н. Ю. Матвеев, м. н. с.,
Федеральный исследовательский центр
комплексного изучения Арктики им. Академика Н. П. Лаверова УрО РАН,
163020, Россия, г. Архангельск, пр. Никольский, д. 20,
e-mail: Klimovskiy.nikolay@yandex.ru

Впервые представлены результаты комплексного исследования реки Сояна в среднем течении. Приведены характеристики гидрологических и гидрохимических показателей, полученных по результатам наблюдений в июле 2020 и марте 2021 гг. Показаны изменения водородного показателя (рН), минерализации, содержания растворённого в воде кислорода, биогенных элементов, а также нефтяных углеводородов в воде и донных отложениях. Оценено соответствие полученных параметров нормативным требованиям к качеству речных вод. Установлено, что по химическому составу воды реки Сояны относятся к гидрокарбонатному классу малой и средней минерализации (164–296 мг/л), слабокислотному и слабощелочному типу (рН 6,0–8,2). Полученные результаты позволяют сделать заключение об отсутствии заметного антропогенного воздействия на рассматриваемый водоток: содержание нефтяных углеводородов в речных водах не превышало 0,010 мг/л, в донных отложениях диапазон составлял – от 0,2 до 3,2 мг/кг, что не превышало предельно допустимых концентраций. Максимальное содержание нефтяных углеводородов в грунтах было зафиксировано в нижнем течении реки, где донные отложения представлены в виде илистого песка. Оценена межгодовая изменчивость гидролого-гидрохимических характеристик в направлении от истока к устью реки, а также уточнена взаимосвязь и закономерность их распределения. Полученные данные могут быть использованы в качестве фоновых для оценки негативного воздействия в случае антропогенной нагрузки на речной бассейн.

Ключевые слова: добыча алмазов, река Сояна, растворённый кислород, водородный показатель, биогенные элементы, нефтяные углеводороды, донные отложения.

The ecological status of the Soyana River in the zone of possible impact of a diamond deposit

© 2023. N. V. Klimovskiy ORCID: 0000-0002-2862-1701¹
A. P. Novoselov ORCID: 0000-0001-9501-8120², N. Yu. Matveev ORCID: 0000-0001-8220-4063³
N. P. Laverov Federal Research Center for Integrated
Arctic Research of the Ural Branch Academy of Science,
20, Nikolsky Prospekt, Arkhangelsk, Russia, 163020,
e-mail: Klimovskiy.nikolay@yandex.ru

The article presents the results of a comprehensive study of the Soyana River for the first time. The characteristics of hydrological and hydrochemical parameters were obtained while observations in July 2020 and March 2021. Changes in the hydrogen index (pH), mineralization, and the content of dissolved oxygen and biogenic elements in water, as well as petroleum hydrocarbons in water and bottom sediments were studied using generally accepted in hydrochemical practice methods. The data obtained were evaluated for compliance with the regulatory requirements for the river water quality. According to the chemical composition, the Soyana River water belongs to the hydrocarbonate class of small and medium mineralization (164–296 mg/L), weakly acidic and slightly alkaline type (pH 6.0–8.2). The data obtained allow us to conclude that there is no noticeable anthropogenic impact on the considered watercourse. The petroleum hydrocarbons content in water and bottom sediments was below maximum permissible concentrations. In river water it was below 0.010 mg/L, in bottom sediments – in the range from 0.2 to 3.2 mg/kg. The maximum content of petroleum hydrocarbons in soils was recorded in the lower course of the river, where bottom sediments are presented in the form of silty sand. The interannual variability of hydrological and hydrochemical characteristics in the direction from the source to the mouth of the river is estimated. The relationship and regularity of their distribution was specified. The data obtained can serve as background data for assessing the negative impact in case of anthropogenic load on the river basin.

Keywords: diamond mining, Soyana River, dissolved oxygen, pH, biogenic elements, petroleum hydrocarbons, bottom sediments.

Мониторинг состояния поверхностных вод в пределах особо охраняемых природных территорий (ООПТ) приобретает всё большую значимость в связи с возрастающим антропогенным воздействием на природную среду [1–3].

За последнее десятилетие многочисленные публикации в научных журналах были посвящены исследованиям разработки месторождений алмазов и воздействия на окружающую среду [4–11]. География алмазодобывающей деятельности расширилась и за счёт Архангельской области, на территории которой активно ведутся работы по разведке, оценке производственных мощностей и промышленной разработке месторождений. Одной из отличительных особенностей кимберлитовых пород Архангельского месторождения алмазов является интенсивное омыление [12], что создаёт дополнительные проблемы, связанные с негативным воздействием на окружающую среду при эксплуатации этих пород.

Известно, что разработка месторождений сопровождается активным воздействием на окружающую природную среду региона, которая характеризуется рядом уникальных особенностей, требующих особого внимания и контроля в процессе промышленного производства. Район месторождений характеризуется богатой флорой и фауной, речная система р. Сояна относится к водным объектам высшей категории как лососевая нерестовая река. Характерной особенностью района является нахождение на его территории особо охраняемых природных территорий регионального значе-

ния (Приморский ландшафтный заказник, Соянский биологический заказник), в том числе проектируемых (национальный парк «Беломорско-Кулойское плато»). Этот факт свидетельствует о том, что район месторождения характеризуется сочетанием уникальных природных условий, требует охраны. На данный момент первоочередными задачами экологического сопровождения деятельности алмазодобывающего комплекса, на наш взгляд, являются: системный мониторинг состояния компонентов окружающей среды, оценка их изменения, прогнозирование и предотвращение рисков возникновения чрезвычайных ситуаций, экологическая экспертиза планов и проектов, принимаемых к реализации на месторождении [11].

В работе приводятся материалы исследований, проведённых в период с 2020 по 2021 гг. на речной экосистеме, затронутой косвенно (Соянский бассейн) при освоении алмазоносного месторождения им. В.П. Гриба (рис. 1b). В настоящее время семужье-нерестовая река Сояна пока не находится в зоне непосредственного влияния горно-обогатительного комбината (ГОКа) алмазоносного месторождения им. В.П. Гриба, т. е. сброса неочищенных сточных вод в неё не происходит. Утилизация отработанных вод производится на поверхностных полях фильтрации (болота), выполняющих функцию природного фильтра. В то же время существует риск, что поля фильтрации переполнятся, и недоочищенные сточные воды будут поступать в р. Сояна. В этом случае химический состав воды изменится, и эти изме-

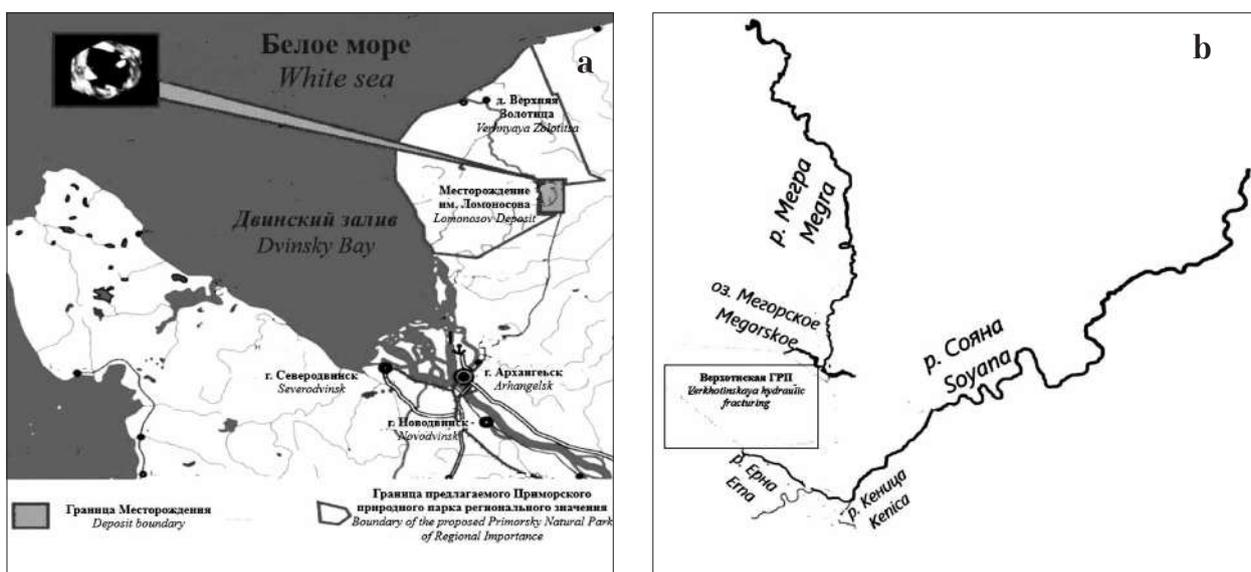


Рис. 1. Месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова (а) и В.П. Гриба (b) в Архангельской области
 Fig. 1. Diamond deposits named after M.V. Lomonosov (a) and V.P. Grib (b) in the Arkhangelsk Region

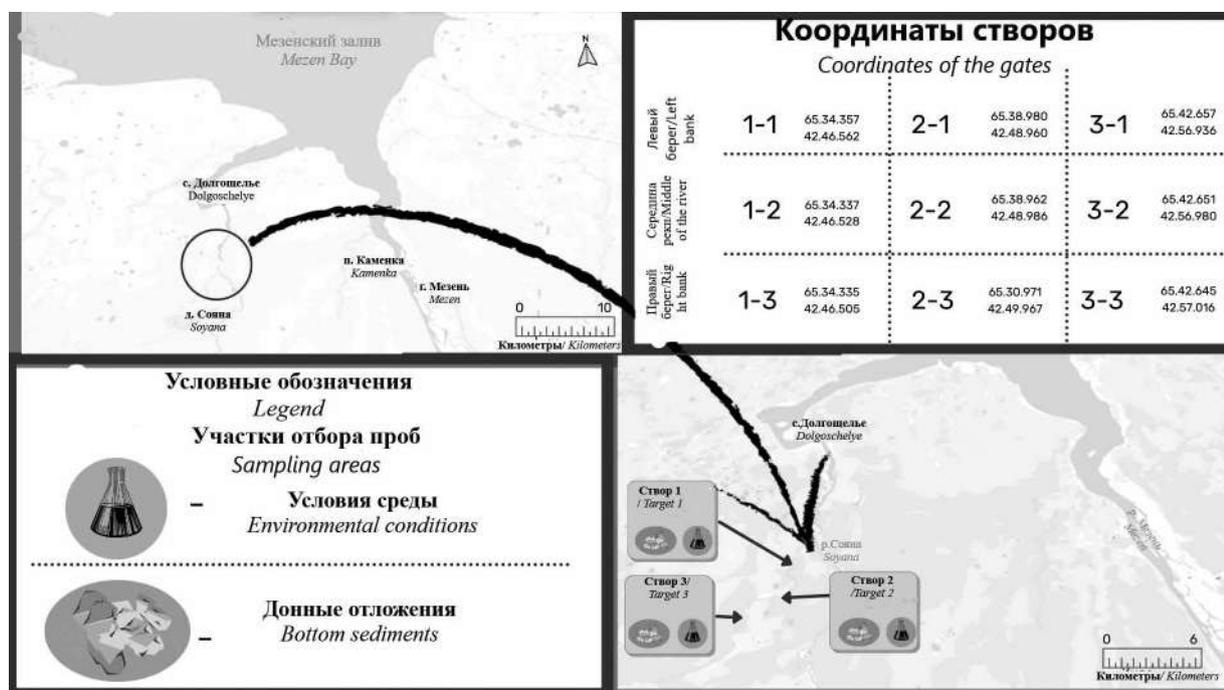


Рис. 2. Карта-схема отбора проб на р. Сояна в июле 2020 и марте 2021 гг.
Fig. 2. Schematic map of sampling on the Soyana River in July 2020 and March 2021

нения можно будет сравнивать с полученными в данной работе результатами.

Пока никаких сбросов в речной бассейн не выявлено, другие потенциальные источники загрязнения можно во внимание не принимать. Это достаточно труднодоступный таёжный район, где сельскохозяйственные угодья практически отсутствуют. Населённый пункт (д. Сояна) находится только в самом устье перед впадением в р. Кулой и не влияет на водоток в целом. Иными словами, приведённый в статье фактический материал может служить отправной точкой при оценке сукцессионных изменений в речной экосистеме в случае поступления в водоток неочищенных (или слабо очищенных) вод с площади водосбора.

Целью работы явилось выявление химических параметров семужье-нерестовой реки Сояна для использования их в качестве фоновых при возможном появлении антропогенной нагрузки и оценки в целом экологического состояния речного бассейна.

Материалы и методы исследования

Месторождение им. В. П. Гриба расположено в 115 км к северу от г. Архангельска и в 25 км к северо-востоку от месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова. Утилизация отработанных вод проводится на поверхностные поля фильтрации (болота) [13], потенциально

участвуя в формировании вод, питающих на площади водосбора семужье-нерестовую реку Сояна.

В данной работе применены общепринятые методики определения основных биогенных элементов и нефтяных углеводородов. Представлены данные по содержанию биогенных элементов в водах, водородному показателю, растворённому кислороду и минерализации, а также по содержанию нефтяных углеводородов в воде и донных отложениях.

Работы выполнялись в русле р. Сояна – в июле 2020 и марте 2021 гг. – в среднем течении. В летний период 2020 г. исследования выполнялись на 3 створах на 3 станциях, в зимнюю межень 2021 г. на 2 створах на 2 станциях. Определение координат мониторинговых станций выполнялось с помощью прибора спутниковой навигации GPS «Garmin». Исследовалось качество воды в реках на основе анализа химического состава воды и донных отложений на предмет промышленного загрязнения поллютантами (рис. 2).

Отбор проб донных отложений в обследованных реках проводили согласно ГОСТ 17.1.5101-80 с использованием дночерпателя Петерсона с площадью захвата 0,025 м². В отобранных пробах определяли нефтепродукты согласно ПНД Ф 14.1:2:4.128-98 (2012) и ПНД Ф 16.1:2.21-98. Пробы воды согласно ГОСТ 17.1.3.07-82 отбирали с поверхностного

горизонта (0–0,5 м) пластиковым батометром Нискина. Анализировались следующие параметры: температура, рН, минерализация, содержание растворённого кислорода и биогенных элементов (нитритов, нитратов, аммонийного азота, фосфатов, общего азота и фосфора, кремния).

Химические анализы проведены в соответствии с общепринятыми в гидрохимической практике методами [14–16]. Растворённый в воде кислород фиксировали с помощью оксиметра Cond Ox1 3205, активную реакцию среды рН и минерализацию воды определяли с помощью рН-метра 3210 и кондуктометра МАРК-603.

Концентрацию фосфатного (минерального) фосфора определяли методом Морфи-Райли с применением аскорбиновой кислоты в качестве восстановителя. Определение аммонийного азота выполняли по методике Сэджи-Солорзано с гипохлоритом и фенолом, нитритов – методом Бендшнайдера и Робинсона с сульфаниламидом и N-(1-нафтил)этилендиамином. Нитраты определяли фотометрическим методом с салициловой кислотой по ПНД Ф 14.1:2.4. Определение кремния проводили колориметрическим методом Королёва.

Для приведённых параметров в каждом из двух выделенных периодов получены среднее, минимальное, максимальное значения, медиана, стандартное отклонение. Полученные значения сравнивали с предельно допустимыми концентрациями (ПДК).

Результаты и обсуждение

Гидрологические и гидрохимические условия реки Сояны. Водная система бассейна р. Сояна, впадающей в реку Кулой и несущей свои воды в Мезенский залив Белого моря, включает базовый водоток и также систему проточных озёр на площади его водосбора. Водоток образуется от слияния рек Кепина и Котуга, вытекающих из холодных озёр Кепинской системы, является левобережным притоком р. Кулой и имеет длину водотока, равную 140 км. Впадает в неё на 54 км от устья. Площадь водосбора составляет 5860 км². На ней расположено 692 озера общей площадью водного зеркала, равной 58,6 км². Принимает в основное русло 96 притоков общей протяжённостью 270 км [17]. Галечно-каменистые грунты встречаются на всём протяжении реки. Средняя глубина реки – 1,5–4 м, средняя ширина – 60–70 м. Русло в низовье реки прямое, песчано-каменистое, устойчивое. Частично

зарастает высшей водной растительностью. Берега глинистые, задернованные, высокие, устойчивые.

Долина реки имеет трапециевидную форму шириной до 8 км. Её склоны высотой 25–30 м пологие, сложены песчаными грунтами и поросшие хвойным лесом. Пойма водотока двусторонняя, при этом левобережная – неровная, заболоченная, поросшая лесом и кустарником, правобережная – луговая. Питание реки смешанное. Весенний подъём уровня воды начинается в первой декаде мая, при ранней весне – во второй декаде апреля, при поздней – в третьей декаде мая. Весеннее половодье длится от 30 до 70 дней, амплитуда годового колебания уровня воды составляет от 1,8 до 6,5 м [18].

Разработка месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова открытым карьерным способом приводит к изменению гидрологического режима и загрязнению территории. Разработка «Трубки им. В.П. Гриба» также способствует этому явлению и окажет влияние на химический состав воды в реке Сояна, био-разнообразию и природные комплексы.

По полученным нами данным среднее значение водородного показателя в р. Сояна для условий летнего периода 2020 г. составило 7,2 ед. (табл. 2). При этом распределение рН на различных участках реки (створах) было неоднородно. Так, в первом створе воды имели слабощелочные свойства, и значения рН составляли в среднем 8,1. На втором створе значения водородного показателя уменьшились до значений 6,0 с последующим увеличением на 3 створе до значений 7,2 (табл. 1).

В зимний подлёдный период (март 2021 г.) значения рН природной воды исследованной акватории не выходили за пределы нормативных значений и изменялись на разных станциях в пределах от 7,5 до 7,7 (при естественных значениях для речных вод 6,5–8,5).

В распределении растворённых газов (кислорода) и биогенных элементов (соединений азота и фосфора) ключевую роль играют биогеохимические процессы (дыхание гидробионтов, деструкция органического вещества) и антропогенное влияние (смыв с сельскохозяйственных угодий и пр.) [19]. Так, нехватка содержания кислорода в воде влияет на интенсивность обмена веществ рыб, происходит снижение устойчивости ко многим ядам органической и неорганической природы, всё это приводит к нарушению нормальной жизнедеятельности рыб. При 30%-ном насыщении воды кислородом устойчивость

рыб к токсическим веществам уменьшается в 7 раз по сравнению со 100% насыщением. На содержание кислорода в реках влияют физические условия обогащения кислородом (скорость течения, температура воды и т. п.), а также выделение кислорода водными растениями и т. д. [20].

Количество растворённого в воде кислорода в летний период 2020 г. изменялось на разных станциях от 6,7 до 9,1 мг/л, в зимний подлёдный период 2021 г. – от 6,2 до 8,3 мг/л (табл. 1). Количество растворённого в воде кислорода является одним из главных гидрохимических показателей и санитарного состояния водного объекта. В соответствии с нормативами качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения содержание растворённого кислорода не должно быть менее 6,0 мг/л – данный норматив соблюдается для всех исследованных проб.

По степени минерализации воды подразделяются на четыре ступени: малой (до 200 мг/л), средней (200–500 мг/л), повышенной (500–1000 мг/л) и высокой минерализации (более 1000 мг/л) [21]. В летний период 2020 г. минерализация в исследуемом водоёме была однородной и в среднем составляла 194 мг/л (табл. 2). В зимний период 2021 г. минерализация в среднем составляла 282 мг/л. Максимальное значение (296 мг/л) было зафиксировано на 2 створе у левого берега реки (табл. 1). Большое влияние на содержание солей в воде оказывают процессы криогенного концентрирования, когда образование ледяного покрова приводит к повышению концентраций основных ионов. Поэтому по сравнению с летним периодом минерализация воды возросла в 1,2 раза. Исходя из полученных данных, воды р. Сояна можно отнести к группе малой и средней минерализации.

Соединения азота и фосфора имеют важное значение для обитателей водоёмов. Нутриенты являются биологически значимыми элементами, необходимыми для обеспечения нормальной жизнедеятельности живых организмов [22].

Наличие нитритов в пресных водах может свидетельствовать о процессах неполного разложения органики, когда бактериальные сообщества не успевают «обработать» поступающее органическое вещество в силу различных факторов (сильное загрязнение, неблагоприятные условия для развития бактерий). Содержание нитритов в воде, как правило, невелико и приурочено к местам локального загрязнения различного генезиса

[19]. По результатам исследований 2020 г. содержание нитритов составляло ниже предела обнаружения методики определения < 0,5 мкг/л (табл. 1). В зимний период 2021 г. концентрация нитритов в пробах колебалась от аналитического нуля до 2,1 мкгN/л (табл. 1). Максимальные значения были зафиксированы на станциях, расположенных на правом берегу на обоих створах. Имеются данные [22], что максимальные концентрации нитритов наблюдаются в конце лета. Согласно существующим нормативам [23], критический уровень, равный 20 мкг/л, не был превышен ни в одной из проанализированных проб.

Среди минеральных форм азота доминирует нитратная форма. Максимальные концентрации нитратов были зафиксированы в летний период 2020 г. в первом створе и находились в диапазоне от 61 до 65 мкг/л. На втором створе содержание нитратов уменьшилось до значений 47 мкгN/л с последующим увеличением концентрации до значений 56 мкгN/л на третьем створе (табл. 1). В зимний период 2021 г. содержание нитратов в р. Сояна изменялось в пределах 64–80 мкгN/л (табл. 1). Концентрации нитратов достигают максимума в конце гидрологической зимы за счёт восстановления при регенерации органической материи и конвективного перемешивания с нижележащими водами. Предельное значение содержания нитратов не должно превышать 9000 мкгN/л, согласно нормативам [23]. По полученным нами результатам, концентрация нитратов в водах нижнего течения р. Сояна находится значительно меньше указанного норматива.

Концентрация ионов аммония в речных водах обычно колеблется в пределах сотых, десятых долей мг/л, при этом увеличение содержания аммонийного азота, как правило, сопряжено с увеличением уровня трофности водоёма. Сезонная динамика концентраций аммонийного азота имеет следующие особенности: минимальные значения наблюдаются в марте-апреле, когда процессы разложения белковых веществ в водоёмах практически отсутствуют.

Содержание аммонийного азота в водах р. Сояны в летний период 2020 г. изменялось незначительно в диапазоне от 36,8 до 58,5 мкгN/л (табл. 1), при среднем значении 45,5 мкгN/л (табл. 2). Максимальная концентрация зафиксирована у правого берега ст. № 2. В зимний период 2021 г. диапазон содержания аммонийного азота в р. Сояна изменялся от 6,41 до 13,2 мкгN/л (табл. 2).

В соответствии с нормативами [23], содержание аммонийного азота в водах не должно превышать 500 мкг/л. Содержание в воде аммонийного азота на исследованных участках было значительно ниже установленной ПДК как в летний, так и в зимний (подлёдный) период.

Показатель «общий азот» характеризует валовое содержание всех форм азота в пробах воды, и именно он обычно используется для характеристики антропогенной нагрузки на природную среду. Содержание общего азота в водах исследованного нами района в летний период 2020 г. в среднем составило 107 мкгN/л (табл. 2). Максимальная концентрация наблюдалась на 2 створе у левого берега реки, где составляла 159 мкгN/л. Зимой концентрация общего азота увеличилась до значений 234 мкгN/л (табл. 1).

Фосфор является одним из важнейших биогенных элементов, но высокая концентрация его солей может ограничивать развитие жизни в водоёме. Повышение содержания фосфатов до нескольких мг/л указывает, как правило, на загрязнение данного водоёма [24]. Повышенные концентрации фосфора приводят к эвтрофированию водоёма и действуют неблагоприятно на рыб и даже могут вызывать отравление [21].

Диапазон изменения концентраций фосфатов в водах р. Сояна в летнюю межень 2020 г. составил от 14,2 до 27,3 мкгP/л (табл. 1). Максимальное содержание этого элемента было зафиксировано также на станции № 2 у левого берега. В зимний период 2021 г. наблюдалось максимальное содержание фосфатов в водной толще, связанное с минерализацией органического вещества. По полученным данным, средняя концентрация фосфатов составила 13,4 мкгP/л (табл. 2). Максимальное значение (27,3 мкгP/л) было зафиксировано во 2 створе у левого берега реки. Согласно нормативам [23] содержание фосфатов не должно превышать 50 мкг/л – данный норматив в исследуемом нами районе также не превышен. По данным химического анализа в летний период 2020 г. содержание общего фосфора в исследуемом участке изменялось незначительно – от 20,4 до 27,5 мкгP/л (табл. 1). Зимой концентрация снижалась до 15,6 мкгP/л (табл. 2).

Соединения кремния находятся в водах в растворённом, взвешенном и коллоидном состояниях, соотношения между которыми определяются составом вод, температурой, рН и другими факторами. Полученные нами

результаты показывают, что в летний период 2020 г. диапазон изменения концентраций кремния составил от 1440 до 1690 мкг/л (табл. 1). Наиболее высокие его концентрации были отмечены во 2 створе у левого берега. Также более высокие концентрации были отмечены и в 3 створе. Для солей кремния характерен выраженный сезонный ход с зимним максимумом и летним минимумом. Содержание кремния на исследуемом участке в зимний период 2021 г. изменялось незначительно, в пределах от 2720 до 2900 мкг/л (табл. 1), не превысив норматива (10000 мкг/л) [23]. Максимальные значения были связаны, по всей видимости, с увеличением роли грунтовых вод в питании реки, богатых биогенными веществами, когда процессы развития фитопланктона незначительны.

По полученным нами данным содержание нефтепродуктов в поверхностных водах р. Сояна в период исследований не превышало 0,010 мг/л (табл. 1, 2). При уровне ПДК = 0,05 мг/л [23] превышений не отмечено в период наблюдений.

Донные отложения являются одним из наиболее информативных компонентов водных экосистем. Обладая депонирующими свойствами, они способны аккумулировать загрязняющие вещества, поступающие в водные объекты в течение длительного времени и, следовательно, являются надёжным индикатором экологического состояния не только самих водных объектов, но и обширных водосборных площадей. Благодаря этому донные отложения представляют особую ценность в системе мониторинга техногенно нарушенных территорий [25]. Следует отметить, что содержание нефтепродуктов в донных отложениях российскими нормативными документами не регламентируется. Согласно литературным источникам [26–28], сублетальные и пороговые эффекты для гидробионтов по нефтепродуктам проявляются при их концентрации в воде от 1 мкг/л; в донных отложениях от 10 до 100 мкг/г.

Донные отложения в р. Сояна представлены в основном в виде глины, илистого песка и гальки. В летний период содержание нефтепродуктов в грунтах реки исследованного района изменялось незначительно – от 0,2 до 3,2 мг/кг (табл. 1). Максимальное содержание было зафиксировано в 3 створе на станции, которая расположена в середине реки, где донные отложения представляют собой илистый песок. В зимний период исследований содержание нефтепродуктов снизилось на

Таблица 1 / Table 1
Химический состав и гидрологические характеристики воды реки Сояны в летний период 2020 г./зимний период 2021 г.
Chemical composition and hydrological characteristics of the Soyana River water in the summer of 2020/in winter 2021

Показатель Index	1 створ / 1 target			2 створ / 2 target			3 створ / 3 target			ПДК _{р.х.} MPC _г
	левый берег left bank	середина middle	правый берег right bank	левый берег left bank	середина middle	правый берег right bank	левый берег left bank	середина middle	правый берег right bank	
pH	8,2±0,1 7,7±0,1	8,1±0,1 —	8,0±0,1 7,7±0,1	6,7±0,1 7,6±0,1	6,4±0,1 —	7,4±0,1 7,5±0,1	7,2±0,1 —	7,2±0,1 —	6,0±0,1 —	6,5–8,5 —
O ₂ , мг/л mg/L	8,60±0,28 6,20±0,20	8,00±0,26 —	9,10±0,29 7,10±0,23	8,80±0,28 8,00±0,26	6,70±0,21 —	7,10±0,23 8,30±0,27	6,70±0,21 —	8,40±0,27 —	8,40±0,27 —	— 6,0
Минерализация, мг/л Mineralization, mg/L	164,0±1,7 288,0±2,9	189,0±1,9 —	215,0±2,2 262,0±2,7	181,0±1,8 296,0±3,0	185,0±1,9 —	198,0±2,0 283,0±2,9	210,0±2,1 —	201,0±2,0 —	206,0±2,1 —	— —
Нефтяные углеводороды, мг/л / Petroleum hydrocarbons, mg/L	0,010±0,007 0,010±0,007	0,010±0,007 —	0,010±0,007 0,010±0,007	0,010±0,007 0,010±0,007	0,010±0,007 —	0,010±0,007 0,010±0,007	0,010±0,007 —	0,010±0,007 —	0,010±0,007 —	0,05 —
Нефтяные углеводороды, мг/кг / Petroleum hydrocarbons, mg/kg	1,9±0,7 1,2±0,4	2,9±1,0 —	0,2±0,1 1,6±0,6	1,2±0,4 1,2±0,4	1,0±0,3 —	1,2±0,4 1,4±0,5	1,1±0,4 —	3,2±1,1 —	0,7±0,2 —	до 100
Si, мкг/л µg/L	1440±60 2720±110	1480±60 —	1540±60 2840±120	1690±70 2900±120	1480±60 —	1500±60 2830±120	1650±70 —	1650±70 —	1620±70 —	10000
P-PO ₄ ³⁻ , мкгP/л µgP/L	16,0±1,6 10,8±2,7	16,1±1,6 —	14,8±1,5 19,4±1,9	27,3±2,5 12,7±1,3	18,1±1,8 —	14,2±1,5 10,8±1,2	16,2±1,6 —	17,1±1,7 —	19,6±1,9 —	50
N-NH ₄ ⁺ , мкгN/л µgN/L	37±8 6,4±1,4	44±10 —	49±11 8,2±1,8	46±10 13,2±2,9	44±10 —	59±13 7,1±1,6	46±10 —	43±10 —	43±10 —	500
N-NO ₃ ⁻ , мкгN/л µgN/L	64±14 80±18	65±14 —	61±14 71±16	51±11 64±14	54±12 —	47±10 74±16	50±11 —	56±12 —	49±11 —	40000
N-NO ₂ ⁻ , мкгN/л µgN/L	< 0,5* < 0,5*	< 0,5* —	< 0,5* 2,05±0,16	< 0,5* < 0,5*	< 0,5* —	< 0,5* 1,07±0,14	< 0,5* —	< 0,5* —	< 0,5* —	20
N _{общ.} , мкг/л N _{total} ² , µg/L	178±17 234±20	163±16 —	152±15 179±17	159±16 155±16	104±13 —	104±13 182±17	115±13 —	109±13 —	109±13 —	—
P _{общ.} , мкг/л P _{total} ² , µg/L	24±3 16±0,9	26±4 —	27±4 14±0,9	22±3 15±0,9	22±3 —	23±3 18±1,2	27±4 —	28±4 —	20,4±2,9 —	—

Примечание: * – ниже предела обнаружения метода, ПДК_{р.х.} – для объектов рыбохозяйственного значения, «–» – исследования не проводили.
Note: * – below the detection limit of the method, MPC_г – for objects of fishery importance, “–” – no research has been done.

Таблица 2 / Table 2

Статистические характеристики показателей вод р. Сояна в летний период 2020 г./зимний период 2021 г. / Statistical characteristics of the Soyana River water indicators in summer 2020/in winter 2021

Статистические характеристики Statistical characteristics	Показатели / Indexs									
	минерализация, мг/л mineralization, mg/L	pH	O ₂ мг/л mg/L	N-NO ₃ ⁻ , мкг N/л µg N/L	P-PO ₄ ³⁻ , мкгP/л µgP/L	Si мкг/л µg/L	N-NH ₄ ⁺ , мкгN/л µgN/L	N _{общ.} , мкг/л N _{total} , µg/L	P _{общ.} , мкг/л P _{total} , µg/L	нефтяные углеводороды, мг/кг petroleum hydrocarbons, mg/kg
Среднее значение Average value	<u>194</u> 282	<u>7.2</u> 7,6	<u>7.9</u> 7,4	<u>55.1</u> 72,2	<u>17.7</u> 13,4	<u>1560</u> 2823	<u>45.5</u> 8,7	<u>107</u> 188	<u>24.2</u> 15,6	<u>1.5</u> 1,4
Стандартное отклонение Standard deviation	<u>16</u> 15	<u>0.8</u> 0,1	<u>0.9</u> 0,9	<u>6.8</u> 7,0	<u>3.9</u> 4,1	<u>92</u> 76	<u>5.8</u> 6,0	<u>44</u> 33	<u>2.8</u> 2,0	<u>1.0</u> 0,2
Медиана Median	<u>198</u> 285	<u>7.2</u> 7,6	<u>8.4</u> 7,6	<u>53.7</u> 72,4	<u>16.2</u> 11,8	<u>1537</u> 2834	<u>43.8</u> 7,7	<u>83</u> 180	<u>23.7</u> 15,3	<u>1.2</u> 1,3
Максимальное значение Maximum value	<u>215</u> 296	<u>8.2</u> 8,3	<u>9.1</u> 8,3	<u>64.8</u> 80,4	<u>27.3</u> 19,4	<u>1692</u> 2904	<u>58.5</u> 13,2	<u>178</u> 234	<u>27.5</u> 18,3	<u>3.2</u> 1,6
Минимальное значение Minimum value	<u>165</u> 261	<u>6.0</u> 7,5	<u>6.7</u> 6,2	<u>46.5</u> 63,6	<u>14.2</u> 10,8	<u>1439</u> 2720	<u>36.8</u> 6,4	<u>62</u> 155	<u>20.4</u> 13,6	<u>0.2</u> 1,2

некоторых станциях, где их среднее значение составляло 1,4 мг/кг (табл. 2).

Заключение

Проведение комплексного мониторинга экосистемы р. Сояна позволило выявить основные характеристики её современного состояния. Установлено, что концентрации солей фосфора, азота и кремния как в летний, так и в зимний периоды наблюдений не превысили предельно допустимых значений для рыбохозяйственных водоёмов. Значения концентрации растворённого кислорода в водах в исследуемые периоды находились в норме. Случаев снижения его величины ниже уровня ПДК (т. е. проявления заморных явлений) не было отмечено ни на одном участке отбора. Воды р. Сояны можно отнести к гидрокарбонатному классу малой и средней минерализации. Кислотная реакция среды относится к слабокислотному и слабощелочному типу. Концентрация нефтепродуктов в воде не превышала предельно допустимую концентрацию. Содержание нефтяных углеводородов в донных отложениях было незначительно и составляло в среднем 1,5 мг/кг.

Полученные в ходе исследования данные позволили количественно оценить сезонную

изменчивость гидролого-гидрохимических характеристик в направлении от истока к устью реки, а также уточнить взаимосвязи и закономерности их распределения. Они могут быть использованы в качестве фоновых в случае изменения экологической ситуации в речном бассейне реки Сояны и поступлении в водоток неочищенных или слабо очищенных промышленных стоков.

Работа выполнена в рамках государственного задания FUUW-2022-0068 «Изучение изменений в экосистеме р. Северная Двина и в водоёмах особо охраняемых природных территорий (ООПТ) Европейского северо-востока России в условиях климатических сукцессий и воздействия антропогенных факторов» (гос. рег. № 122011800593-4).

Авторы благодарны научному сотруднику лаборатории пресноводных и морских экосистем ФИЦКИА УрО РАН О.Ю. Моревой за ценные советы, обсуждение и помощь в работе.

Литература

1. Адамович Т.А., Скугорева С.Г., Товстик Е.В., Ашихмина Т.Я. Изучение особенностей химического состава водных объектов заповедной территории для использования в качестве регионального фона // Тео-

- ретическая и прикладная экология. 2020. № 1. С. 89–96.
2. Borodina E.V., Borodina U.O. Water chemistry formation in lakes of specially protected natural areas in the Altay Mountains: case study of the Mul'ta River // *Water Resources*. 2019. V. 46. No. 4. P. 582–594.
3. Лукьянова Н.В., Мясков А.В. Влияние горной промышленности на особо охраняемые природные территории // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2007. № 6. С. 223–330.
4. Абдувалиев А.М., Худайбергенова Б.М. Сезонная миграция загрязняющих веществ в поверхностных водах в результате деятельности горнодобывающей компании в Кыргызстане // *Теоретическая и прикладная экология*. 2016. № 1. С. 27–32.
5. Валуев Е.П. Этапы освоения месторождения алмазов им. М. В. Ломоносова // *Горный журнал*. 2002. № 7. С. 29–32.
6. Вольперт Я.Л. Трансформация наземных экосистем в результате воздействия алмазодобывающей промышленности // *Успехи современного естествознания*. 2012. № 11. С. 80–82.
7. Гололобова А.Г., Легостаева Я.Б. Экогеохимический мониторинг почвенного покрова на участках алмазодобычи в Западной Якутии // *Известия политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2020. Т. 331. № 12. С. 146–157.
8. Котова Е.И., Нецветаева О.П., Решетняк О.С. Воздействие разработки месторождения алмазов им. М. В. Ломоносова на экосистему реки Золотицы // *Арктика: экология и экономика*. 2022. Т. 12. № 2 (46). С. 191–199.
9. Поздняков А.И., Вольперт Я.Л. Анализ воздействия алмазодобывающей промышленности на окружающую среду северо-западной Якутии // *Проблемы региональной экологии*. 2008. № 2. С. 24–28.
10. Посухова Т.В., Дорофеев С.А., Гаранин К.В., Сяоин Г. Отходы алмазодобывающей промышленности: минеральный состав и способы утилизации // *Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология*. 2013. № 2. С. 38–48.
11. Шевелева А.В., Шварцман Ю.Г. Проблемы экологической безопасности при разработке месторождения алмазов имени Ломоносова // *Вестник С(А)ФУ. Естественные науки*. 2012. № 2. С. 40–47.
12. Шпиляева Д.В. Геологическое строение, минеральный состав и эколого-экономические аспекты освоения трубки Архангельская (месторождение алмазов им. М.В. Ломоносова): автореферат канд. геол.-минер. наук. М., 2008. 20 с.
13. Арнаутов А.И., Исаков М.С. Инженерно-экологические проблемы при разработке месторождения алмазов им. В.П. Гриба // *Записки Горного института*. 2003. Т. 153. С. 117–119.
14. Сапожников В. В., Агатова А.И., Аржанова Н.В., Мордасова Н.В., Лапина Н.М., Зубаревич В.Л., Лукьянова О.Н., Торгунова Н.И. Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоёмов и перспективных для промысла районов Мирового океана. М.: ВНИРО, 2003. 202 с.
15. Справочник по водным ресурсам СССР. Л.: Государственный гидрологический институт и Центральное бюро водного кадастра, 1934. Т. 2. 665 с.
16. MacFeeters S.K. The use of Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water feature // *International Journal of Remote Sensing*. 1996. V. 17. No. 7. P. 1425–1432.
17. Ресурсы поверхностных вод СССР. Гидрологическая изученность. Л.: Гидрометеоздат, 1965. Т. 3. Северный край. 610 с.
18. Онищук Р.П. Союзна. Поморская энциклопедия. Т. 2. Природа Архангельского Севера. Архангельск: Поморский ГУ, 2007. С. 486.
19. Овсянный Е.И., Орехова Н.А. Гидрохимический режим реки Черной (Крым): экологические аспекты // *Морской гидрофизический журнал*. 2018. Т. 34. № 1. С. 82–94.
20. Привезенцев Ю.А. Гидрохимия пресных водоёмов. М.: Пищевая промышленность, 1973. 120 с.
21. Алекин О.А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеоздат, 1953. 296 с.
22. Петин А.Н., Лебедева М.Г., Крымская О.В. Анализ и оценка качества поверхностных вод. Белгород: БелГУ, 2006. 252 с.
23. Приказ Минсельхоза РФ от 13 декабря 2016 г. № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» [Электронный ресурс] <https://rulaws.ru/acts/Prikaz-Minselhoza-Rossii-ot-13.12.2016-N-552> (Дата обращения: 16.01.2023).
24. Метелев В.В., Канаев А.И., Дзасохова Н.Г. Водная токсикология. М.: Колос, 1971. 247 с.
25. Решетняк В.Н., Закруткин В.Е., Гибков Е.В. Интегральная оценка техногенного загрязнения речных отложений углепромышленной территории Восточного Донбасса // *Теоретическая и прикладная экология*. 2022. № 4. С. 80–87.
26. Московченко Д.В. Нефтедобыча и окружающая среда: эколого-геохимический анализ Тюменской области. Новосибирск: Наука, 1998. 112 с.
27. Никаноров А.М., Иванов В.В., Брызгалов В.А. Реки Российской Арктики в современных условиях антропогенного воздействия. Ростов-на-Дону: НОК, 2007. 280 с.
28. Никаноров А.М., Страдомская А.Г. Проблемы нефтяного загрязнения пресноводных экосистем: монография. Ростов-на-Дону: НОК, 2008. 222 с.

References

1. Adamovich T.A., Skugoreva S.G., Tovstik E.V., Ashikhmina T.Ya. Studying the characteristics of the

chemical composition of water bodies of the protected area for use as a regional background // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 1. P. 89–96 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-089-096

2. Borodina E.V., Borodina U.O. Water chemistry formation in lakes of specially protected natural areas in the Altay Mountains: case study of the Mul'ta River // *Water Resources*. 2019. V. 46. No. 4. P. 582–594. doi: 10.1134/0097807819040055

3. Lukyanova N.V., Myaskov A.V. Influence of the mining industry on specially protected natural areas // *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2007. No. 6. P. 223–330 (in Russian).

4. Abduvaliev A.M., Khudaibergenova B.M. Seasonal migration of pollutants in surface waters as a result of the activity of a mining company in Kyrgyzstan // *Theoretical and Applied Ecology*. 2016. No. 1. P. 27–32 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2016-1-033-037

5. Valuev E.P. Stages of development of the diamond deposit named after M.V. Lomonosov // *Gornyi Zhurnal*. 2002. No. 7. P. 29–32 (in Russian).

6. Volpert Ya.L. Transformation of terrestrial ecosystems as a result of the impact of the diamond mining industry // *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2012. No. 11. P. 80–82 (in Russian).

7. Golobova A.G., Legostaeva Ya.B. Ecogeochemical monitoring of soil cover at diamond mining sites in Western Yakutia // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020. V. 331. No. 12. P. 146–157 (in Russian). doi: 10.18799/24131830/2020/12/2948

8. Kotova E.I., Netsvetaeva O.P., Reshetnyak O.S. Impact of the Lomonosov diamond deposit exploitation on the Zolotitsa river ecosystem // *Arctic: Ecology and Economy*. 2022. V. 12. No. 2 (46). P. 191–199 (in Russian). doi: 10.25283/2223-4594-2022-2-191-199

9. Pozdnyakov A.I., Volpert Ya.L. Analysis of diamond-mining industry impact on the environment in the north-west Yakutia // *Problemy regionalnoy ekologii*. 2008. No. 2. P. 24–28 (in Russian).

10. Posukhova T.V., Dorofeev S.A., Garanin K.V., Xiaoying G. Wastes of diamond mining industry – mineralogical composition and methods of the utilization // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4: Geologiya*. 2013. No. 2. P. 38–48 (in Russian).

11. Sheveleva A.V., Shvartsman Yu.G. Problems of environmental safety at development of the Lomonosov diamond deposit // *Arctic Environmental Research*. 2012. No. 2. P. 40–47 (in Russian).

12. Shpilevaya D.V. Geological structure, mineral composition and ecological and economic aspects of the development of the Arkhangel'skaya pipe (diamond deposit named after M.V. Lomonosov): Abstract of the candidate of geol.-miner. sciences. Moskva, 2008. 20 p. (in Russian).

13. Arnautov A.I., Iskhakov M.S. Engineering and environmental problems in the development of the V.P. Grib diamond deposit // *Zapiski Gornogo instituta*. 2003. V. 153. P. 117–119 (in Russian).

14. Sapozhnikov V.V., Agatova A.I., Arzhanova N.V., Mordasova N.V., Lapina N.M., Zubarevich V.L., Lukyanova O.N., Torgunova N.I. Guidance on the chemical analysis of marine and fresh waters during the environmental monitoring of fishery water bodies and areas promising for fishing in the World Ocean. Moskva: Publishing House of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, 2003. 202 p. (in Russian).

15. Reference book on water resources of the USSR. Leningrad: Gosudarstvennyy gidrologicheskiy institut i Tsentralnoe byuro vodnogo kadastra, 1934. V. 2. 665 p. (in Russian).

16. MacFeeters S.K. The use of Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water feature // *International Journal of Remote Sensing*. 1996. V. 17. No. 7. P. 1425–1432. doi: 10.1080/01431169608948714

17. Surface Water Resources of the USSR. Hydrological Study. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1965. V. 3. Northern Region. 610 p. (in Russian).

18. Onischuk R.P. Soyana // *Pomor encyclopaedia*. V. 2. Nature of the Arkhangel'sk North. Arkhangel'sk: Pomor State University, 2007. P. 486 (in Russian).

19. Ovsyany E.I., Orekhova N.A. Hydrochemical regime of the River Chernaya (Crimea): environmental aspects // *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*. 2018. V. 34. No. 1. P. 82–94 (in Russian). doi: 10.22449/0233-7584-018-1-82-94

20. Privezentsev Yu.A. Hydrochemistry of freshwater bodies. Moskva: Pishchevaya promyshlennost, 1973. 120 p. (in Russian).

21. Alekin O.A. Basics of Hydrochemistry. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1953. 296 p. (in Russian).

22. Petin A.N., Lebedeva M.G., Krymskaya O.V. Analysis and assessment of the quality of surface waters. Belgorod: BelGU, 2006. 252 p. (in Russian).

23. Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation No. 552 dd. December 13.2016 “Concerning approval of water quality standards for fishery water bodies, including maximum permissible concentrations of hazardous substances in waters of fishery water bodies” [Internet resource] <https://rulaws.ru/acts/Prikaz-Minselhoza-Rossii-ot12/13/2016-N-552> (Accessed: 16.01.2023).

24. Metelev V.V., Kanaev A.I., Dzasokhova N.G. Water toxicology. Moskva: Kolos, 1971. 247 p. (in Russian).

25. Reshetnyak V.N., Zakrutkin V.E., Gibkov E.V. Integral assessment of technogenic pollution of river sediments in the coal mining area of the Eastern Donbass // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 4. P. 80–87 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-080-087

26. Moskovchenko D.V. Oil production and environment: ecological and geochemical analysis of the Tyumen Region. Novosibirsk: Nauka, 1998. 112 p. (in Russian).

27. Nikanorov A.M., Ivanov V.V., Bryzgalov V.A. Rivers of the Russian Arctic under current conditions of anthropogenic impact. Rostov-na-Donu: NOK, 2007. 280 p. (in Russian).

28. Nikanorov A.M., Stradomskaya A.G. Problems of oil pollution of freshwater ecosystems. Rostov-na-Donu: NOK, 2008. 222 p. (in Russian).

Использование основных гидрохимических и гидробиологических показателей для определения инвариантного состояния Куйбышевского водохранилища и его притоков

© 2023. Т. А. Кондратьева¹, к. б. н., гидробиолог,
Т. В. Никоненкова², к. ф.-м. н., доцент, А. Р. Гайсин², аспирант,
Т. Р. Латыпова², аспирант, Н. Ю. Степанова², д. б. н., профессор,
¹Управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды
Республики Татарстан,
420021, Россия, г. Казань, ул. Заводская, д. 3,
²Казанский федеральный (Поволжский) университет,
420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлёвская, д. 18,
e-mail: tatjana_kondrate@mail.ru, step090660@yandex.ru

Методом экологических модификаций определено инвариантное состояние водных экосистем бассейна Средней Волги. На основе анализа многолетней режимной гидрохимической и гидробиологической информации методами математической статистики (кластерного, иерархического кластерного анализа, ординационных методов), исследованные водные объекты были сгруппированы по химическому составу воды с выделением главных показателей природного и антропогенного генезиса. Выделены общие показатели химического состава воды (температура, минерализация, жёсткость, содержание нефтепродуктов, ионов хрома), влияющие на изменение качественных и количественных характеристик гидробиоценозов, а также специфические показатели (азотсодержащие соединения, фосфаты, хлориды, сульфаты, ионы меди и железа), отрицательно влияющие на количественные и качественные характеристики гидробиоценозов. Для оценки инвариантного состояния использована группа инфузорий – цилиопланктон (качественные и количественные характеристики). В экосистеме Куйбышевского водохранилища цилиопланктон характеризовался высоким видовым разнообразием, что является признаком антропогенного напряжения. В реках количественные характеристики цилиопланктона низкие, а изменения в сообществе носят характер экологических модуляций. Доля развития коловраток в зоопланктонных сообществах указывает на элементы экологического регресса в экосистемах водных объектов. По уровню развития организмов зообентоса, его численности и относительной доли олигохет в экосистеме Куйбышевского водохранилища наблюдается антропогенное напряжение на большинстве участков, только в районе г. Чистополь – элементы экологического регресса, а у г. Тетюши состояние экосистемы характеризуется как переходное от фонового к антропогенному напряжению. Реки Вятка и Меша характеризуются как фоновые с переходом к антропогенному напряжению; в р. Казанка прослеживается антропогенное эвтрофирование с элементами экологического регресса; реки Степной Зай, Нокса и Илеть испытывают элементы экологического регресса. Получены статистические зависимости показателей гидробиоценоза от гидрохимического состава.

Ключевые слова: водные экосистемы, мониторинг, экологические модификации, инвариантное состояние, экологический регресс, антропогенное напряжение.

Use of basic hydrochemical and hydrobiological indicators to determine the invariant state of the Kuibyshev reservoir and its tributaries

© 2023. T. A. Kondrateva¹ ORCID: 0000-0002-8800-9098¹
T. V. Nikonenkova² ORCID: 0000-0002-8871-2162², A. R. Gaisin² ORCID: 0000-0003-2572-5174²
T. R. Latypova² ORCID: 0000-0003-4353-3782², N. Yu. Stepanova² ORCID: 0000-0003-1733-9062²

¹Department for Hydrometeorology and Environmental Monitoring
of the Republic of Tatarstan,

3, Zavodskaya St., Kazan, Russia, 420021,

²Kazan Federal University,

18, Kremlevskaya St., Kazan, Russia, 420008,

e-mail: tatjana_kondrate@mail.ru, step090660@yandex.ru

The method of ecological modifications was used to determine the invariant state of aquatic ecosystems in the Middle Volga basin. Based on the analysis of long-term regime hydrochemical and hydrobiological information using the methods of mathematical statistics (cluster, hierarchical cluster analysis, ordination methods), the studied water bodies were grouped according to the chemical composition of water, highlighting the main indicators of natural and anthropogenic genesis. We highlighted the general indicators of the chemical composition of water (temperature, salinity, hardness, content of oil products, chromium ions) that affect the change in the qualitative and quantitative characteristics of hydrobiocenoses, as well as specific indicators (nitrogen-containing compounds, phosphates, chlorides, sulfates, copper and iron ions), negatively affecting the quantitative and qualitative characteristics of hydrobiocenoses. A group of ciliates – cilioplankton (qualitative and quantitative characteristics) was used to assess the invariant state. Cilioplankton in the ecosystem of the Kuibyshev reservoir is characterized by high species diversity, which indicates anthropogenic stress. The quantitative characteristics of cilioplankton in rivers are low, and the community changes are ecological modulations. The share of rotifers development in zooplankton indicates the elements of ecological regress in water bodies, as well as anthropogenic eutrophication with elements of ecological regress (in most of the Kuibyshev reservoir). The level of zoobenthos development and its size, as well as the oligochaetes relative proportion indicate anthropogenic stress in the ecosystem of most parts of the Kuibyshev reservoir. The elements of ecological regress are traced only in the area of Chistopol. The water ecosystem in Tetyusha area is characterized as a transition from background to anthropogenic stress. The Vyatka and Mesha rivers are characterized as background rivers with the transition to anthropogenic stress. Anthropogenic eutrophication with elements of ecological regress can be traced in the Kazanka River. The Stepnoy Zai, Noksa and Ilet rivers has elements of ecological regress. Hydrobiocenoses indicators statistically depend on hydrochemical composition.

Keywords: aquatic ecosystems, monitoring, ecological modifications, invariant state, ecological regress, anthropogenic stress.

Исследование водных экосистем, анализ процессов, происходящих в них, в мировой практике мониторинга проводятся схожими методами с использованием общих оценочных подходов. К ним относятся разные системы биоиндикации, адаптированные к условиям региона и его специфики. Чаще всего используются две системы: британская RIVPACS (River Invertebrate Prediction and Classification System) и американская RPBs (Rapid Bioassessment Protocols). В Британской системе используются различные биотические индексы, рассчитываемые по группам зообентоса, в американской – система метрик, в основном, из группы бентосных макробеспозвоночных [1]. Наиболее часто используется Бельгийский биотический индекс [2]. В основе этих систем лежит сравнение сообществ макрозообентоса тестируемого и эталонного створа. Для комплексного анализа используют так называемую систему LP-EII, которая основана на бальной системе, при этом в качестве основных показателей применяют гидрологические, гидрохимические (кислород, ХПК, общий азот и общий фосфор), гидробиологические (хлорофилл *a*, численность зоопланктона, биотический индекс по семействам макробеспозвоночных) [3].

Методика экологических модификаций, разработанная В.А. Абакумовым [4], в системе мониторинга других стран не применяется, однако именно в этом подходе используется обобщение многолетних гидрохимических и гидробиологических данных с проекцией полученных оценок на динамическое состояние экосистемы. Учёт состояния фито-, зоопланктона и зообентоса позволяет расширить

представление о процессах, происходящих в водной экосистеме, уловить тренды её изменения. В настоящее время метод экологических модификаций считается одним из наиболее перспективных [5].

Целью работы было определить экологический статус Куйбышевского водохранилища и его притоков по абиотическим и биотическим компонентам, выявить между ними основные значимые зависимости.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования были выбраны водоёмы и водотоки Республики Татарстан и прилегающих к ней территорий: Куйбышевское водохранилище и его притоки – реки Казанка, Вятка, Степной Зай, Илеть, Noksa, Свияга (рис. 1, см. цв. вкладку V). Исследования выполнены на 23 створах: 9 из них располагаются на Куйбышевском водохранилище (КВ), 14 – на реках.

Проанализированы результаты гидрохимических и гидробиологических наблюдений за 2008–2018 гг. На основе анализа гидрохимических показателей оценивалось качество воды с использованием удельного комбинаторного индекса загрязнения вод (УКИЗВ), рассчитывались модальные интервалы (МИ) основных загрязняющих веществ, оценивались доля и степень антропогенного воздействия [6]. Всего для анализа использовано 19 показателей: растворённый кислород, взвешенные вещества, минерализация, жёсткость, HCO_3^- , биологическое потребление кислорода (БПК₅), ХПК, NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ , Cl^- , SO_4^{2-} ,

Fe_{общ.}, фенолы, нефтепродукты, Cu²⁺, Zn²⁺, Cr_{общ.}, Mn²⁺.

Анализ и оценку состояния экосистем по биотической компоненте (фитопланктон, зоопланктон, инфузории, зообентос) проводили по показателям, рассчитанным согласно формулам, приведённым в [6, 7]: M_{оч} – мода модального интервала общей численности фитопланктона (N_{ph}); P_о – плотность вариационного ряда (P_о = w/k, где w – частота или доля того или иного интервала в сумме всех частот, %; k – величина интервала); относительная численность коловраток в зоопланктоне, N_{rot}, %; общая численность зообентоса, N_{zb}, тыс. экз./м²; относительная численность олигохет в зообентосе, N_{ол}, %; число видов инфузورий (МИ); численность инфузурий, тыс. экз./м³ (МИ). Оценку экологического статуса по показателям инфузурий производили по разработанной нами классификации [8].

Для статистической обработки полученных данных использовали методы кластерного анализа, иерархического кластерного анализа и ординационные методы [9]. Для проверки нормальности распределения количественных признаков использовали тест Колмогорова-Смирнова и тест Шапиро-Уилка. Построение регрессионной модели выполнили с помощью функции lm() в R. Для этого осуществляли предварительную обработку данных: удаление выбросов, применение log-преобразований (Ln(x + a)) к переменным и отклик, скошенным вправо. Для отбора переменных применялась стандартная пошаговая процедура включений с исключениями «слабых» предикторов (функция step() из библиотеки stats в R). Выбор лучшей модели сделан на основе AIC.

Результаты и обсуждение

Анализ химических данных показал, что вода Куйбышевского водохранилища (КВ) – по абиотической компоненте относится к категории грязных. Основной вклад в загрязнение вносили ионы Cu²⁺, ХПК, БПК₅, NH₄⁺, NO₂⁻ и нефтепродукты, загрязнённость воды для которых определялась как характерная. По доле антропогенной нагрузки состояние экосистемы КВ оценивается как переходное от равновесного к кризисному (МИ 6,7–66,7%). По степени антропогенного воздействия – как равновесное (случаев превышения ПДК более чем в 10 раз не отмечалось).

К приоритетным показателям загрязнённости рек относятся органические вещества,

определяемые по ХПК и БПК₅, нефтепродукты, ионы NO₂⁻, Cu²⁺, Fe_{общ.}, NH₄⁺, SO₄²⁻. Реки Казанка, Степной Зай, Нокса, Свияга по абиотической компоненте относятся к категории грязных. По содержанию ионов NH₄⁺ их состояние оценивается как кризисное (МИ 1–4,94 мг/л). По доле антропогенного воздействия все реки были отнесены к переходному состоянию из равновесного в кризисное (МИ 0–66%), а р. Нокса – к кризисному (МИ 35–50%).

Для выявления факторов, определяющих особенности гидрохимического состава исследованных водных объектов, был применён ординационный метод анализа главных компонент (РСА) [9]. Визуализация пространственной конфигурации двух главных компонент РС₁ (минерализация, жёсткость, гидрокарбонаты, ионы Cl⁻, NO₂⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻) и РС₂ (растворённого кислорода, взвешенных веществ, органических веществ по БПК₅, Cr_{общ.}, АСПАВ) позволила разделить объекты исследования на группы (рис. 2, см. цв. вкладку V): Куйбышевское водохранилище (низкая минерализация); р. Казанка (высокая минерализация и жёсткость); р. Вятка (низкая минерализация и содержание анионов); р. Степной Зай (повышенное содержание хлорид-ионов); остальные реки (качество воды определяется преимущественно факторами антропогенной природы). Данное разделение в большей степени определяется природными гидрологическими особенностями формирования гидрохимического режима водных объектов.

Оценка экологического состояния водных объектов по показателям фитопланктона наиболее широко используется для целей экологического мониторинга и считается одной из основных [7, 10, 11]. Для фитопланктона исследованной экосистемы КВ выявлено широкое распределение значений численности фитопланктона по интервалам, однако более 50% данных укладываются в диапазон 0–4, МИ составил 0–2 млн кл./л, частота (W) 37,5–67,0%. Максимальные значения P_о составили 48, что соответствует антропогенному напряжению с элементами экологического регресса. В реках развитие фитопланктонных сообществ отличается достаточно широким размахом количественных характеристик. Река Степной Зай (МИ N_{ph} 0,24–27 млн кл./л) находится в переходном состоянии от антропогенного напряжения с элементами экологического регресса к состоянию с элементами экологического регресса. Последнее характерно и для рек Меша, Нокса, Свияга и Илеть. Для

**Т. А. Кондратьева, Т. В. Никоненкова, А. Р. Гайсин,
Т. Р. Латыпова, Н. Ю. Степанова «Использование основных
гидрохимических и гидробиологических показателей для
определения инвариантного состояния
Куйбышевского водохранилища и его притоков». С. 113.**

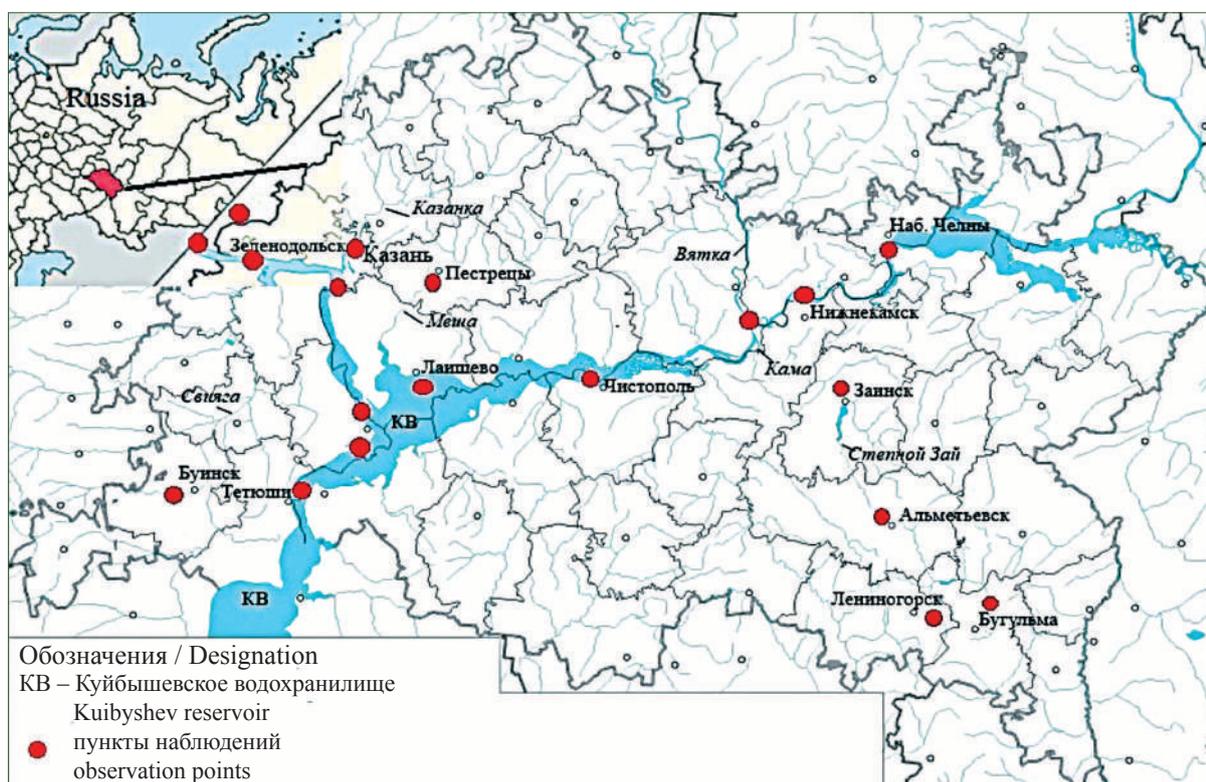


Рис. 1. Карта района исследования с указанием мест отбора проб
Fig. 1. The map of the research area with indication of sampling points

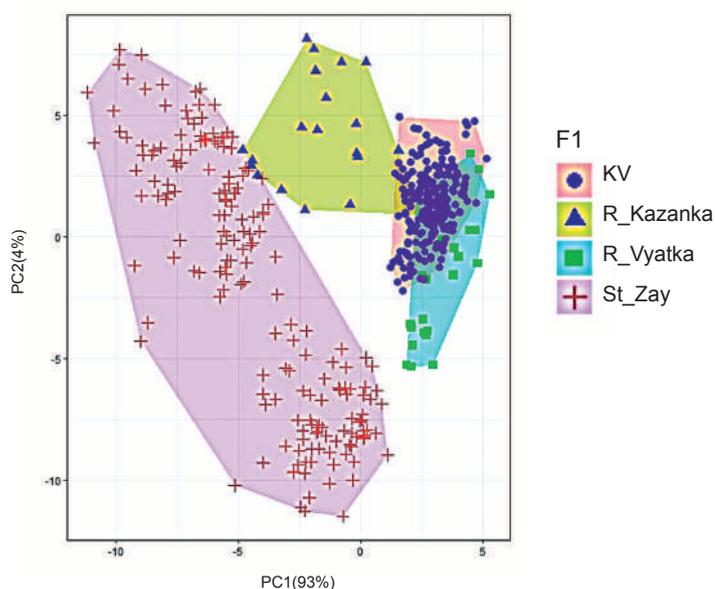


Рис. 2. Пространственное распределение водных объектов ординационным методом главных компонент
Fig. 2. Spatial distribution of water bodies by an ordinates method of main components

р. Казанка характерна высокая (МИ N_{ph} 0,28–300,0 млн кл./л), а для р. Вятка средняя (МИ N_{ph} 0,4–222,8 млн кл./л) степень эвтрофирования.

По мнению многих исследователей инфузории являются важным компонентом планктонного сообщества пресноводных экосистем [12, 13, 19, 20] и удобным объектом для характеристики экологического состояния водоёма, поскольку они чувствительны к изменениям условий окружающей среды и раньше других организмов реагируют на них. В экосистеме КВ цилиопланктон на отдельных участках (ниже г. Казани) характеризовался высоким видовым разнообразием (МИ 8,0–12), что является признаком антропогенного напряжения. В реках количественные характеристики цилиопланктона ниже (МИ 1,0–3,0 и 2,0–5,0 млн экз./м³ соответственно), то есть в условиях естественного состояния экосистемы численность и видовое разнообразие инфузорий не велики, а изменения в сообществе носят характер экологических модуляций.

Сообщества зоопланктона в последнее время часто используются в системе мониторинга для оценки состояния экосистем различных типов [7, 14, 15]. Анализ данных зоопланктона показал, что по относительной доле в сообществе коловраток экосистема КВ в районе городов Казань и Тетюши характеризуется элементами экологического регресса (МИ 31,0–84,0). На остальных участках экосистема испытывает антропогенное эвтрофирование с элементами экологического регресса (МИ 1,0–27,0%). Реки Степной Зай, Вятка, Казанка, Илеть, Меша и Нокса по доле коловраток в сообществе (МИ 71,0–100%) характеризуются как экосистемы с элементами экологического регресса.

Показатели развития зообентоса широко используются для оценки качества воды, поскольку наиболее точно отражают изменяющиеся условия водных экосистем [16–18]. Бентосное сообщество КВ характеризуется широким диапазоном колебания численности. В целом экосистема Куйбышевского водохранилища испытывает антропогенное напряжение (МИ N_{zb} – 0,1–4,5 тыс. экз./м², МИ N_{ol} – 0,0–95%). В районе г. Чистополь наблюдаются элементы экологического регресса (N_{zb} – 0,04–1,6 тыс. экз./м², МИ N_{ol} – 20–65%). Только в районе г. Тетюши состояние экосистемы можно охарактеризовать как переходное от фонового к антропогенному напряжению: МИ N_{zb} – 0,9–66,0 тыс. экз./м², МИ N_{ol} – 1,0–17,0%.

В малых реках наблюдаются значительные колебания качественных и количественных характеристик зообентоса. Реки Степной Зай, Нокса и Илеть по общей численности зообентоса и относительной доле олигохет испытывают элементы экологического регресса (МИ N_{zb} 0,10–30,0 тыс. экз./м², МИ N_{ol} – 10,0–99,0%). В р. Казанка прослеживается антропогенное эвтрофирование с элементами экологического регресса (МИ N_{zb} 0,04–26,7 тыс. экз./м², МИ N_{ol} – 10,0–63,0%). Реки Вятка и Меша характеризуются как фоновые с переходом к антропогенному напряжению (МИ N_{zb} 0,2–1,4 тыс. экз./м², МИ N_{ol} – 0,0–25,0%).

Построение корреляционных зависимостей между химическим составом воды и показателями зоопланктонного сообщества показало наличие связи ($r^2 = 0,38$, p -value: $< 2.2e-16$) между численностью зоопланктона (N_{zp}) и рядом физических и химических факторов:

$$N_{zp} = -3,55 + 0,067T - 0,37Cl + 1,54Min + 1,37BOD_5 - 0,21PO_4 + 0,51Cr - 0,20Cu + 0,27Npr$$

(T – температура, Cl – хлориды, Min – минерализация, BOD_5 – биологическое потребление кислорода, PO_4 – фосфаты, Cr – хром общий, Cu – медь, Npr – нефтепродукты).

Аналогичная зависимость получена и для биомассы зоопланктона V_{zp} ($r^2 = 0,35$, p -value: $< 2.2e-16$):

$$V_{zp} = -1181 + 0,08T + 170O_2 + 0,7Min + 1,57BOD_5 - 0,37PO_4 + 0,3Cr + 0,19NO_2 - 0,82COD + 0,3Npr$$

(O_2 – кислород, NO_2 – нитриты, COD – химическое потребление кислорода).

Показатели зоопланктона зависят от температуры и растворённого кислорода, что не удивительно, учитывая то, что эти факторы являются ключевыми для развития планктонных организмов. Положительная связь отмечена с минерализацией, содержанием нефтепродуктов, которые до определённого уровня способствуют увеличению кормового потенциала, и нитритами. Отрицательная связь отмечена для органических веществ (по ХПК и БПК) и фосфатов – фактора, определяющего развитие фитопланктона, а также Cu . Положительная связь с Cr может свидетельствовать о том, что интервалы его содержания в воде исследованных объектов не являются критическими для развития планктонных сообществ.

Регрессионная модель зависимости характеристик инфузорий от химического состава воды была приведена нами ранее [21],

основными влияющими компонентами были температура, хлориды, минерализация, гидрокарбонаты, БПК₅, нитраты, железо и нефтепродукты.

Построение регрессионных моделей зависимости численности и биомассы фитопланктона от гидрохимических показателей показало наличие связи с температурой, минерализацией, содержанием органических веществ (по БПК), аммонийными соединениями. Положительная связь численности (N), отсутствие связи биомассы (B) фитопланктона с содержанием нефтепродуктов свидетельствует о стимулировании развития мелких форм водорослей при наличии небольшого нефтяного загрязнения. Наличие положительной связи показателей фитопланктона с содержанием Fe, Cu, Cr указывает на то, что даже при превышении нормативов для Fe, Cu, типичном для воды исследованных водных объектов, не являются ингибирующими для развития водорослей факторами. Отрицательная связь отмечена для содержания хлоридов и фосфатов в воде:

$$N_{ph} = -7,56 + 0,13T - 0,37Cl + 1,32Min + 0,96BOD_5 + 0,27NH_4 - 0,37PO_4 + 0,30Fe + 0,28Cu + 0,18Npr; (r^2 = 0,34, p\text{-value}: < 2.2e-16; NH_4 - \text{аммоний}, NO_3 - \text{нитраты}, Fe - \text{железо}).$$

$$B_{ph} = -2,057 + 0,18T + BOD_5 - 0,34PO_4 - 0,12NO_3 + 0,27Fe + 0,45Cu + 0,47Cr (r^2 = 0,37, p\text{-value}: < 2.2e-16).$$

Полученная регрессионная модель зависимости численности зообентоса от химического состава воды показала наличие относительно слабой, но статистически значимой связи ($r^2 = 0,17, p\text{-value}: 4.084e-15$) с взвешенными веществами, жёсткостью, минерализацией, а также содержанием аммонийных солей, хрома и нефтепродуктов и отрицательной связи с содержанием сульфатов, хлоридов, карбонатов и железа:

$$N_{zb} = 6,19 + 0,028Vzv - 0,014 Cl - 0,015SO_4 + 0,007Min + 0,147Zhest - 0,01HCO_3 + 0,619NH_4 - 1,659Fe + 0,097Cr + 1,823Npr (Vzv - \text{взвешенные вещества}, Zhest - \text{жёсткость}, HCO_3 - \text{гидрокарбонаты}).$$

То есть, содержащиеся в воде нефтепродукты оказывают на организмы зообентоса слабый стимулирующий эффект также, как и на фитопланктон.

Заключение

В результате полученных в ходе исследования данных было определено инвариантное состояние водных экосистем Куйбышевского

водохранилища и его притоков. С использованием ординационных методов исследованные водные объекты были поделены на 4 группы по общности формирования гидрохимического состава. В первую группу вошли водные объекты лентического типа (Куйбышевское водохранилище) и три группы лотического типа – реки Казанка, Вятка и Степной Зай, отличающиеся разным уровнем минерализации, содержанием гидрокарбонат-, сульфат-, хлорид-ионов и др.

Получены регрессионные модели зависимости биотических показателей от абиотических. Из последних наиболее значимыми для всех групп оказались температура, минерализация, жёсткость, содержание нефтепродуктов, хрома, а также специфические показатели, отрицательно влияющие на характеристики гидробионтов, к которым относятся азотсодержащие соединения, фосфаты, хлориды, сульфаты, медь и железо.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках научного проекта № 18-44-160027.

This work was funded by the subsidy allocated to Kazan Federal University for the state assignment in the sphere of scientific activities, project No. FZSM-2022-0003.

Работа выполнена на счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, проект № FZSM-2022-0003.

Литература

1. Ohio EPA. Addendum to biological criteria for the protection of aquatic life. Users manuals for biological field assessment of Ohio surface waters // Ohio Environmental Protection Agency, Columbus, Ohio. 1989. V. 2. 50 p.
2. DePauw N., Vannevel R. Macroinvertebrates and water quality. Antwerp., 1993. 316 p.
3. Wang P., Lai G.Y., Li L. Predicting the hydrological impacts of the Poyang lake project using a 400 EFDC model // Journal of Hydrologic Engineering. 2015. V. 20. No. 12. Article No. 05015009.
4. Абакумов В.А. Экологические модификации и развитие гидробиоценозов // Экологические модификации и критерии экологического нормирования: Труды международного симпозиума. Л.: Гидрометеоздат, 1991. С. 18–40.
5. Булгаков Н.Г. Индикация состояния природных экосистем и нормирование факторов окружающей среды. Обзор существующих подходов // Успехи современной биологии. 2002. Т. 122. № 2. С. 115–135.

6. РД 52.24.661-2004. Рекомендации. Оценка риска антропогенного воздействия приоритетных загрязняющих веществ на поверхностные воды суши. М.: Метеоагентство Росгидромета, 2006. 25 с.

7. Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем / Под ред. В.А. Абакумова. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 318 с.

8. Кондратьева Т.А. Экологические модификации цилиопланктона водных объектов Республики Татарстан // Вода: химия и экология. 2016. № 4 (94). С. 10–16.

9. Шитиков В.К., Зинченко Т.Д. Многомерный статистический анализ для экологических сообществ (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 1. С. 5–11.

10. Chellappa N.T., Câmara F.R.A., Rocha O. Phytoplankton community: indicator of water quality in the Armando Ribeiro Gonçalves Reservoir and Pataxy Channel, Rio Grande do Norte, Brazil // Braz. J. Biol. 2009. V. 69. No. 2. P. 241–251.

11. Ростанец Д.В., Хазанова К.П., Хромов В.М. Проблемы использования фитопланктона в гидробиологическом мониторинге рек высокоурбанизированных территорий (на примере реки Москвы) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 3 (2). С. 677–684.

12. Berninger U.G., Finlay B.J., Canter H.M. The spatial distribution and ecology of zoochlorellae-bearing ciliates in a productive pond // The Journal of Protozoology. 1986. V. 33. No. 4. P. 557–563.

13. Beaver J.R., Crisman T.L. The role of ciliated protozoa in pelagic freshwater ecosystems // Microbial Ecology. 1989. V. 17. P. 111–136.

14. Reddy Y.R. Zooplankton diversity: freshwater planktonic copepoda with key to common calanoid and cyclopoid genera in India // Water quality assessment, biomonitoring and zooplankton diversity / Ed. B.K. Sharma. New Delhi: Ministry of Environment and Forests, Government of India, 2002. P. 174–189.

15. Derevenskaya O.Yu., Umyarova R.M. Zooplankton as an indicator of river ecological condition // International Journal of Pharmacy & Technology. 2016. V. 8. No. 2. P. 14567–14574.

16. Barton D.R. Some problems affecting the assessment of Great Lakes water quality using benthic invertebrates // Journal of Great Lakes Research. 1989. V. 15. No. 4. P. 611–622.

17. Alonso A. Valoración del Efecto de la Degradación Ambiental sobre los Macroinvertebrados benticos en la Cabecera del Río Henares // Ecosistemas. 2006. V. 15. No. 2. P. 1–5.

18. Dorić S., Čučuković A. Community structure and diversity of macrozoobenthos in quarry Ribnica's creek as indicator of surface water management // Genetics & Applications. 2018. V. 1. No. 2. P. 29–35.

19. Xu H., Jiang Y., Xu G. Identifying functional species pool of planktonic protozoa for discriminating water

quality status in marine ecosystems // Ecological Indicators. 2016. V. 62. P. 306–311.

20. Zhong X., Xu G., Xu H. Use of multiple functional traits of protozoa for bioassessment of marine pollution // Marine Pollution Bulletin. 2017. V. 119. No. 2. P. 33–38.

21. Kondrateva T.A., Nikonenkova T.V., Stepanova N.Yu. Using cilioplankton as an indicator of the ecological condition of aquatic ecosystems // Geosciences. 2019. V. 9. No. 11. Article No. 464.

References

1. Ohio EPA. Addendum to biological criteria for the protection of aquatic life. Users manuals for biological field assessment of Ohio surface waters // Ohio Environmental Protection Agency, Columbus, Ohio. 1989. V. 2. 50 p.

2. DePauw N., Vannevel R. Macroinvertebrates and water quality. Antwerp., 1993. 316 p.

3. Wang P., Lai G.Y., Li L. Predicting the hydrological impacts of the Poyang lake project using a 400 EFDC model // Journal of Hydrologic Engineering. 2015. V. 20. No. 12. Article No. 05015009. doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001240

4. Abakumov V.A. Ecological modifications and the development of hydrobiocenoses // Environmental modifications and criteria for environmental regulation: Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1991. P. 18–40 (in Russian).

5. Bulgakov N.G. Indication of the state of natural ecosystems and rationing of environmental factors. Review of existing approaches // Uspekhi sovremennoy biologii. V. 122. No. 2. P. 115–135 (in Russian).

6. RD 52.24.661-2004. Recommendations. Assessment of the risk of anthropogenic impact of priority pollutants on the land surface. Moskva: Mетеоагентство Росгидромета, 2006. 25 p. (in Russian).

7. Guidelines for hydrobiological monitoring of freshwater ecosystems / Ed. V.A. Abakumov. Sankt-Peterburg: Gidrometeoizdat, 1992. 318 p. (in Russian).

8. Kondrateva T.A. Ecological modifications of water bodies' cilioplankton of the Republic of Tatarstan // Water: Chemistry and Ecology. 2016. No. 4 (94). P. 10–16 (in Russian).

9. Shitikov V.K., Zinchenko T.D. Multivariate statistical analysis for ecological communities (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 1. P. 5–11 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-1-005-011

10. Chellappa N.T., Câmara F.R.A., Rocha O. Phytoplankton community: indicator of water quality in the Armando Ribeiro Gonçalves Reservoir and Pataxy Channel, Rio Grande do Norte, Brazil // Braz. J. Biol. 2009. V. 69. No. 2. P. 241–251. doi: 10.1590/s1519-69842009000200003

11. Rostanets D.V., Khazanova K.P., Khromov V.M. Problems of use the phytoplankton in hydrobiological monitoring of the rivers at high-urbanized territories (on the example of Moscow River) // Izvestiya Samarskogo

nauchnogo centra Rossiyskoy akademii nauk. 2013. V. 15. No. 3 (2). P. 677–684 (in Russian).

12. Berninger U.G., Finlay B.J., Canter H.M. The spatial distribution and ecology of zoochlorellae-bearing ciliates in a productive pond // *The Journal of Protozoology*. 1986. V. 33. No. 4. P. 557–563. doi: 10.1111/j.1550-7408.1986.tb05662.x

13. Beaver J.R., Crisman T.L. The role of ciliated protozoa in pelagic freshwater ecosystems // *Microbial Ecology*. 1989. V. 17. P. 111–136. doi: 10.1007/BF02011847

14. Reddy Y.R. Zooplankton diversity: freshwater planktonic copepoda with key to common calanoid and cyclopoid genera in India // *Water quality assessment, biomonitoring and zooplankton diversity* / Ed. B.K. Sharma. New Delhi: Ministry of Environment and Forests, Government of India, 2002. P. 174–189.

15. Derevenskaya O.Yu., Umyarova R.M. Zooplankton as an indicator of river ecological condition // *International Journal of Pharmacy & Technology*. 2016. V. 8. No. 2. P. 14567–14574.

16. Barton D.R. Some problems affecting the assessment of Great Lakes water quality using benthic invertebrates // *Journal of Great Lakes Research*. 1989. V. 15. No. 4. P. 611–622. doi: 10.1016/s0380-1330(89)71515-x

17. Alonso A. Assessment of the effect of environmental degradation on benthic macroinvertebrates in the headwaters of the Henares Rive // *Ecosistemas*. 2006. V. 15. No. 2. P. 1–5 (in Spanish).

18. Dorić S., Čučuković A. Community structure and diversity of macrozoobenthos in quarry Ribnica's creek as indicator of surface water management // *Genetics & Applications*. 2018. V. 1. No. 2. P. 29–35. doi: 10.31383/ga.vol1iss2pp29-35

19. Xu H., Jiang Y., Xu G. Identifying functional species pool of planktonic protozoa for discriminating water quality status in marine ecosystems // *Ecological Indicators*. 2016. V. 62. P. 306–311.

20. Zhong X., Xu G., Xu H. Use of multiple functional traits of protozoa for bioassessment of marine pollution // *Marine Pollution Bulletin*. 2017. V. 119. No. 2. P. 33–38. doi: 10.1016/j.marpolbul.2017.03.043

21. Kondrateva T.A., Nikonenkova T.V., Stepanova N.Yu. Using cilioplankton as an indicator of the ecological condition of aquatic ecosystems // *Geosciences*. 2019. V. 9. No. 11. Article No. 464. doi: 10.3390/geosciences9110464

Транслокация тяжёлых металлов в растения из почв вблизи Алавердского горно-металлургического комбината

© 2023. А. Р. Сукиасян¹, д. т. н., доцент, Т. А. Джангириян², к. с.-х. н., н. с.,
С. А. Унанян², д. с.-х. н., доцент, в. н. с., А. А. Киракосян¹, к. т. н., доцент,

¹Национальный политехнический университет Армении,
0009, Армения, г. Ереван, ул. Теряна, д. 105,

²Национальный аграрный университет Армении,
0009, Армения, г. Ереван, ул. Теряна, д. 74,
e-mail: sukiasyan.astghik@gmail.com

Изучена степень техногенной нагрузки вблизи Алавердского горно-металлургического комбината по содержанию тяжёлых металлов (ТМ) в образцах почвы и растений, выращенных на опытных делянках. Исследования проводили в период работы комбината не в полную мощность (весна-лето 2022 г.) с учётом направления розы ветров в регионе. Отбор коричнево-лесных почв проводили из верхнего горизонта почвы с глубины 0–25 см на выделенных опытных делянках, которые были удалены на 3; 10; 30 км от комбината. На экспериментальных площадях в условиях открытого грунта выращивали растения картофеля, свёклы, моркови, перца и баклажана. Содержание ТМ в образцах почвы и растений определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии. По валовому содержанию ТМ в образцах почв из близких к комбинату делянок (3 км) установлен сравнительный ряд $Cu > Pb > Zn > Co > Mn$. В данной серии экспериментов по содержанию подвижных форм ТМ сравнительный ряд имеет такую же последовательность, но с более низкими значениями. Для Cu, Pb, Zn и Co величина степени их подвижности в образцах почвы в среднем была 15,5%, в случае Mn – 25,5% (3 км). Показано, что в образцах почвы из удалённых делянок (30 км) по направлению розы ветров наибольшей степенью подвижности отличились Cu, Co и Mn (в среднем 14,3%), степень подвижности Pb и Zn составила 8%. Результаты расчётов био- и геоэкологических коэффициентов показали, что исследуемые растения характеризуются индивидуальным сценарием развития процессов метаболизма, и общей адаптационной стратегией к действию стресс-фактора. Установлено, что ТМ в большей степени накапливаются в генеративных органах растений, чем в вегетативных, что объясняется различием в толерантности растений к данным химическим элементам.

Ключевые слова: почва, растения, тяжёлые металлы, антропогенное загрязнение, степень подвижности, коэффициент концентрации, коэффициент биологического накопления, индекс мобильности.

Translocation of heavy metals into plants from the soil near the Alaverdi copper smelting enterprise

© 2023. A. R. Sukiasyan¹ ORCID: 0000-0001-5549-3146, T. A. Jhangiryan² ORCID: 0000-0002-6557-9303,
S. A. Hunanyan² ORCID: 0000-0001-6370-3377, A. A. Kirakosyan¹ ORCID: 0000-0003-4447-8383

¹National Polytechnic University of Armenia,
105, Teryan St., Yerevan, Republic of Armenia, 0009,

²Armenian National Agrarian University,
74, Teryan St., Yerevan, Republic of Armenia, 0009,
e-mail: sukiasyan.astghik@gmail.com

The levels of heavy metals (HMs) in soil samples and plants grown on experimental plots near the Alaverdi copper smelting enterprise has been studied. The studies were conducted during the period of the enterprise's operating in incomplete capacity (spring – summer 2022). The wind direction in the region was taken into account. The brown forest soils were taken from the topsoil horizon at a depth of 0–25 cm on the selected pilot plots located within 3; 10; 30 km from the enterprise. Potato, beet, carrot, pepper and eggplant were grown in field plots. The contents of HMs in soil and plant samples were determined by atomic absorption spectroscopy. A comparative series of $Cu > Pb > Zn > Co > Mn$ was established according to the gross HMs content in soil samples from plots close to the enterprise (3 km). In this series of experiments the comparative series of mobile forms of HMs follows the same sequence but with lower values. The mobility of Cu, Pb, Zn and Co in soil samples was on average 15.5%, in the case of Mn – 25.5% (3 km). The highest mobility in soil samples from distant plots (30 km) in the wind-rose direction was detected for Cu, Co, and Mn (14.3% on average),

and the mobility of Pb and Zn was 8%. Calculations of bio-ecological and geo-ecological coefficients showed that the studied plants are characterized by individual scenario of metabolic processes, but a common adaptation strategy to the stressor. It has been shown that HMs accumulate more in the reproductive organs of plants than in the vegetative ones. This explains the differences in plant tolerance to chemical elements.

Keywords: soil, plants, heavy metals, anthropogenic pollution, mobility, concentration factor, biological accumulation factor, mobility index.

Неконтролируемый рост производства ксенобиотиков приводит к загрязнению окружающей среды (ОС). Эти соединения не встречаются в ОС, но поступая из различных антропогенных источников, мигрируют и участвуют в биохимических циклах [1]. Работа металлургических и горнодобывающих предприятий сопровождается поступлением в ОС таких токсичных элементов, как тяжёлые металлы (ТМ). Тяжёлые металлы – это группа из 52 элементов, включая свинец (Pb), молибден (Mo), медь (Cu), цинк (Zn) и кобальт (Co), влияние которых на живые организмы зависит от их концентрации [2]. Токсичность последних стала одной из серьёзных опасностей, в том числе и для культурных растений, которая выражается в снижении их продуктивности [2]. Известно, что добыча полезных ископаемых приводит к загрязнению почвы, в первую очередь, изменяя природный уровень ТМ в почве, её химический состав [3, 4]. Почва является важным геохимическим резервуаром, где относительно легко накапливаются ТМ, а удаляются очень медленно из-за своей бионеразлагаемости [5]. В почве ТМ присутствуют в жидкой и твёрдой фазах. Если в первом случае ТМ встречаются в виде гидратированных ионов или растворимых органических и неорганических комплексов, то в твёрдой фазе они находятся в виде нерастворимых осадков на поверхности органических и неорганических коллоидов в обменной и специфически поглощённой форме. Между различными формами ТМ устанавливается динамическое равновесие в соответствии с характеристиками среды их проникновения и распространения [6–8].

Полученные из геологических источников ТМ обычно находятся в недоступных для растений формах [9]. Но, благодаря процессам сорбции и десорбции, они поглощаются как подземными, так и надземными частями растений [10]. Почва является базовой отправной точкой для поступления опасных элементов в сельскохозяйственные культуры, мигрируя затем в системе почва–растение [11, 12]. Впоследствии по пищевой цепи они попадают в организм человека, вызывая угрозу его здоровью [13]. При этом биодоступность ТМ

тесно связана с процессами их миграции по органам растения [14, 15]. С одной стороны, такие элементы, как **Cu, Zn, Fe, Mn**, необходимы для развития растений и ответственны за многие регулярные процессы в них [2, 16], с другой – их избыточные концентрации являются опасными, изменяя ход процессов метаболизма [17, 18].

Загрязнение компонентов ОС (воздух, вода, почва) ТМ и их токсичными соединениями приводит к безвозвратному изменению экосистем, к снижению биоразнообразия и, самое главное, к нарушениям здоровья людей, проживающих на таких территориях [19]. Существует серьёзная опасность загрязнения земельных участков вблизи горнодобывающих предприятий [7, 20]. В результате сброса промышленных отходов, ТМ длительное время накапливаются в почвах [21]. В этом контексте Алавердский горно-металлургический комбинат (АГМК) не является исключением, хотя на сегодняшний день он эксплуатируется не в полную мощность, из-за создавшейся вокруг него опасной эколого-токсикологической ситуации. Ранее он был центром по переработке Алавердской группы медно-колчеданных полиметаллических месторождений и ведущим предприятием в системе металлургической промышленности Армении, в составе пыли которого преобладали Cu, Zn, Pb, Mo, Co и др. Было установлено, что ореол распространения техногенных выбросов в данном регионе, зависящий от рельефа местности и направления розы ветров, может наблюдаться на расстоянии 30–35 км, составляя около 10 тыс. га [8, 22]. Ранее в серии экспериментов по определению влияния антропогенной нагрузки, вызванной действующими (Каджаранский медно-молибденовый комбинат и Разданский цементный завод) и недействующими (Алавердский горно-металлургический комбинат и Ванадзорский химический завод) промышленными предприятиями Армении, были выявлены изменения в содержании ТМ и неметаллов в образцах пахотных почв [7]. Анализ полученных результатов по всем четырём промышленным предприятиям показал, что верхний слой почв на расстоянии 5 км от источников сильно загрязнён соедине-

ниями меди, цинка и свинца. На более дальних участках (25 км от источников) отмечено достоверное снижение содержания всех ТМ в образцах почв, а сравнительный ряд в целом представляется в следующей последовательности: $Zn > Cu > Pb > Co > Mo$ [7].

Цель работы: оценка степени загрязнённости почв и растений тяжёлыми металлами на участках, расположенных на различном удалении от источника загрязнения – АГМК Армении.

Объекты и методы исследования

Исследования проводили в ходе полевых, камеральных работ лабораторными агрохимическими анализами почвенных и растительных образцов в весенне-летний период 2022 г. При проведении полевых работ придерживались методики [23]. Объект исследований – коричнево-лесные почвы вблизи АГМК. Отбор образцов почв из верхнего горизонта (0–25 см) осуществляли методом конверта по ГОСТ 17.4.1.02-83 с учётом преобладающего направления ветров в Армении и рельефа местности [24]. Закономерности по содержанию валовых и подвижных форм ТМ в образцах почв определяли на удалении $3,0 \pm 0,2$, $10,0 \pm 0,5$ и $30,0 \pm 1,2$ км от источника загрязнения в северо-восточном направлении [25].

На экспериментальных площадях в условиях открытого грунта выращивали растения картофеля (*Solanum tuberosum* L.) сорта Лорх, свёклы (*Beta vulgaris* L.) сорта Донская плоская 367, моркови (*Daucus carota* L.) сорта Московская зимняя А-515, перца (*Capsicum annum* L.) сорта Болгарский 73 и баклажана (*Solanum melongena* L.) сорта Длинный фиолетовый 239. После созревания овощей с каждого стационарного участка собирали урожай по 1 кг зелёной массы и группировали на ботву и клубни (картофель, свёкла, морковь) и на листья и плоды (перец, баклажан). Биологический материал очищали от видимых примесей, затем последовательно промывали проточной и дистиллированной водой для дальнейших инструментальных исследований [26]. Содержание Cu, Pb, Mo, Zn и Co определяли на атомно-абсорбционном спектрофотометре «AAS-1» (Германия) с последующим пересчётом на сухой вес материала и вычислением определённых геоэкологических коэффициентов [27].

С целью определения степени антропогенной нагрузки полученные результаты

сравнивали с кларковыми и предельно допустимыми концентрациями (ПДК) химических элементов [28]. Степень подвижности ТМ в почве (СП) определяли по формуле:

$$СП = \frac{C_{подв.}}{C_{вал.}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $C_{подв.}$ – содержание подвижных форм ТМ в образцах почвы, мг/кг; $C_{вал.}$ – содержание валовых форм ТМ в образцах почвы, мг/кг. Коэффициент концентраций (K_{ki}) рассчитывали по формуле:

$$K_{ki} = \frac{C_{п.}}{C_{ф.}}, \quad (2)$$

где $C_{ф.}$ – фоновое содержание ТМ в почве, мг/кг [29]; $C_{п.}$ – содержание ТМ в образце почвы экспериментального участка, мг/кг. Значения $1,0 < K_k < 1,5$ соответствуют слабому; $1,5 < K_k < 5,0$ – умеренному; $5,0 < K_k < 10$ – сильному; $K_k > 10,0$ – очень сильному уровню загрязнения.

Классификацию исследуемых образцов почвы по степени загрязнённости ТМ осуществляли по индексу геоаккумуляции:

$$I_{geo} = \log_2(C_n/1,5B_n). \quad (3)$$

где C_n – содержание ТМ в образце почвы, мг/кг; B_n – геохимическое фоновое значение (медиана) для каждого типа почв согласно [28], мг/кг. Категорию загрязнённости (КЗ) почв оценивали по шкале Мюллера [29], согласно которой I класс – практически незагрязнённый фон ($I_{geo} \leq 0$); II класс – незагрязнённый до умеренного ($0 < I_{geo} < 1$); III класс – умеренно загрязнённый ($1 \leq I_{geo} < 2$); IV класс – слегка загрязнённый до сильного ($2 \leq I_{geo} < 3$); V класс – сильно загрязнённый ($3 \leq I_{geo} < 4$); VI класс – от сильно загрязнённого до экстремального ($4 \leq I_{geo} < 5$); VII класс – очень сильно загрязнённый ($I_{geo} > 5$).

Значение коэффициента биологического накопления ($K_{бн}$) рассчитывали по формуле:

$$K_{бн} = \frac{C_{бн}}{C_n}, \quad (4)$$

где $C_{бн}$ – содержание ТМ в биологическом материале, мг/кг; C_n – содержание ТМ в образце почвы, мг/кг.

Значение индекса мобильности (I_m) вычисляли как отношение содержания элемента в листьях (мг/кг) к его содержанию в клубнях, корнеплодах и плодах (мг/кг) в зоне техногенеза АГМК с учётом розы ветров [30].

Результаты полевых и вегетационных опытов были статистически обработаны методом дисперсионного анализа с вычислением наименьшей существенной разницы (НСР, ц/га). Объединённую пробу почв составляли путём смешивания пяти точечных проб, взятых с одной пробной площадки площадью 1 га. Все проведённые эксперименты имели до 10 аналитических повторностей и статистически обработаны [31].

Результаты и обсуждение

Содержание валовых и подвижных форм тяжёлых металлов в образцах почвы и степень их подвижности. Полученные результаты по содержанию валовых и подвижных форм исследуемых ТМ в образцах почвы, а также степень их подвижности представлены в таблице 1. По валовому содержанию ТМ на выделенных участках в 3 км от источника загрязнения (АГМК) элементы в почве представляются сравнительным рядом $Cu > Pb > Zn > Co > Mn$. При этом валовое содержание меди было наибольшим (1237 мг/кг), а марганца – наименьшим (52 мг/кг). Анализ подвижных форм ТМ в том же диапазоне выявил схожий сравнительный ряд, но уже с многократным уменьшением содержания элементов, видимо из-за неизменности механического состава почвы. Так, в этом случае содержание подвижных форм меди было наибольшим (197 мг/кг), а марганца – наименьшим (9,3 мг/кг).

Картину проясняет расчёт степени загрязнённости почв по величине подвижности ТМ (формула 1). Для большинства исследуемых элементов (Cu, Pb, Zn и Co) значение степени подвижности ТМ в среднем составляет 15,5%, в случае с марганцем – 25,5%. Ситуация имела схожий характер при удалении на расстояние 10 км от АГМК. В данном пространственном диапазоне для остальных ТМ значение степени их подвижности также составляло в среднем 15,5%. Однако на более дальних расстояниях от источника техногенной нагрузки (30 км) с учётом основного направления розы ветров для данного региона наибольшей степенью подвижности отличились Cu, Co и Mn (в среднем 14,3%). Это могло быть связано с почти пятикратным превышением содержаний валовых форм ТМ по сравнению с их подвижными формами. На 30 км степень подвижности Pb и Zn в образцах почв составила в среднем 8% за счёт девятикратного превышения содержаний валовых форм данных элементов по сравнению с их подвижными формами.

Фактически, значительная часть ТМ, которые поступают в верхние горизонты, образует с почвенной органикой малоподвижные металлорганические соединения. При нисходящем стоке дождевых и талых вод они не мигрируют вниз по почвенному профилю. Вероятно, основная доля поступивших в верхние горизонты ТМ продолжает пребывать в свободном состоянии. Затем, под влиянием тока почвенной влаги, они пере-

Таблица 1 / Table 1

Содержание валовых и подвижных форм тяжёлых металлов (мг/кг) и степень их подвижности (%) в зоне влияния Алавердского горно-металлургического комбината
The content of gross and mobile forms of heavy metals (mg/kg) and their mobility (%) in the technogenesis zone of the Alaverdi copper smelting enterprise

Удалённость от источника загрязнения, км Distance from the source of pollution, km	Форма тяжёлого металла Heavy metal forms	Содержание (мг/кг) тяжёлых металлов в образцах почвы и степень их подвижности (%) / Heavy metal concentrations (mg/kg) in soil samples and their mobility (%)				
		Cu	Pb	Mn	Zn	Co
3	В / G	1237±20	677±14	52±3	441±8	64±4
	П / M	197±8	120±5	9,3±0,6	96±4	12,3±1,1
	СП / DM	15,0	17,6	25,2	14,1	15,1
10	В / G	158±7	131±17	4,2±0,5	91±6	26,6±2,2
	П / M	25,1±1,9	23,7±1,7	1,1±0,2	14,7±1,0	3,6±0,4
	СП / DM	16,6	17,9	25,0	15,1	12,6
30	В / G	71±4	44±3	2,6±0,3	67±4	21,5±1,8
	П / M	14,5±1,4	6,7±1,1	0,60±0,04	6,2±1,0	3,7±0,3
	СП / DM	11,6	8,7	15,5	7,3	15,8

Примечание: В – валовая форма, П – подвижная форма, СП – степень подвижности.
Note: G – gross, M – mobile, DM – degree of mobility.

Таблица 2 / Table 2

Значение коэффициента концентраций (K_k) и индекса геоаккумуляции (I_{geo}) тяжёлых металлов в зоне Алавердского горно-металлургического комбината с учётом розы ветров в регионе
 Concentration factor (K_k) and geoaccumulation index (I_{geo}) of heavy metals in the technogenesis zone of the Alaverdi copper smelting enterprise taking into account the wind rose in the region

Удалённость от источника загрязнения, км Distance from the source of pollution, km	Форма тяжёлого металла Heavy metal forms	Cu			Pb			Mn			Zn			Co		
		K_k	I_{geo}	КЗ CS												
3	В / G	31,7	5,3	VI	39,8	5,4	VI	0,1	-3,6	I	5,9	2,7	IV	3,8	2,0	IV
	П / M	5,1	2,8	IV	7,0	2,9	IV	0	-6,1	I	1,3	-0,3	I	0,7	-0,5	I
10	В / G	4,0	4,4	VI	7,7	4,9	VI	0	-4,5	I	1,2	2,1	IV	1,6	1,2	III
	П / M	0,6	1,7	III	1,4	2,4	IV	0	-6,9	I	0,2	0,7	II	0,2	-0,8	I
30	В / G	1,8	1,9	III	2,6	2,8	IV	0	-7,8	I	0,9	-0,1	I	1,3	0,2	II
	П / M	0,4	0,1	I	0,4	0,3	I	0	-9,3	I	0,1	-2,8	I	0,2	-2,7	I

Примечание: В – валовые формы, П – подвижные формы тяжёлых металлов в почве, КЗ – категория (класс) загрязнённой почвы.

Note: G – gross forms, M – mobile forms of heavy metals in the soil, CS – contaminated soil category (class).

мещаются в нижележащие горизонты вплоть до почвообразующих пород. Этим процессам дополнительно способствует механический состав почв, тем самым обеспечивая высокую скорость фильтрации почвенной влаги. В окрестностях источника загрязнения распространены в основном коричневые лесные почвы. Основными почвообразующими породами являются продукты выветривания осадочно-вулканогенных образований: порфириты, андезито-дациты, андезита базальты, известняки, конгломераты, песчаники. А коричневые лесные почвы характеризуются высоким содержанием гумуса (7,0–8,1%), лёгким и среднесуглинистым механическим составом, средней ёмкостью поглощения 33,0–39,6 мг-экв. на 100 г почвы, нейтральной и слабощелочной реакцией среды (рН 6,9–7,8). Миграция металлов в этих почвах обусловлена рядом факторов, важнейшими из которых являются окислительно-восстановительные и кислотно-основные свойства почв, содержание в них органического вещества, гранулометрический состав, а также водно-тепловой режим и геохимический фон региона, не изменяя механического состава почвы на дальних расстояниях. Валовые формы ТМ – потенциальный резерв подвижных химических элементов, которые активно участвуют в биологическом круговороте, характеризую общую загрязнённость почвы.

Накопление ТМ в растениях зависит от многих факторов: степень загрязнённости почвы, биологической особенности растений и т. д. Так как загрязнённость почвенного по-

крова окрестностей АГМК меняется в зависимости от удалённости источника загрязнения, следовательно, меняется также содержание в почве форм ТМ. Нужно отметить, что усваиваемые формы металлов для растений – это количество подвижных форм ТМ, которое находится в прямой зависимости от наличия в почве валовых форм. Таким образом, снижение содержания ТМ в растениях по мере удаления от источника загрязнения находится в прямой зависимости от степени загрязнённости ОС.

Оценка загрязнения почв тяжёлыми металлами по геоэкологическим коэффициентам. Рассчитанные геоэкологические коэффициенты представлены в таблице 2. В целом, все исследуемые химические элементы можно разделить на три основные группы по значению K_k в следующей классификации. Очень сильному уровню загрязнения ($K_k > 10$) соответствуют валовые содержания Cu и Pb в пределах 3 км от источника загрязнения (АГМК) в северо-восточном направлении. Далее по мере удаления от комбината отмечается резкое снижение значение K_k в диапазоне от умеренного до слабого. Особо следует указать случай с Mn. По расчётным данным, вне зависимости от границ распространения загрязнения значения K_k находятся за пределами слабого содержания ($1,0 < K_k < 1,5$) вне зависимости от формы их содержания.

Индекс геоаккумуляции (I_{geo}) позволяет сравнивать содержание химического элемента в исследуемых образцах с его значением в земной коре (кларк концентраций). Однозначно

использование I_{geo} имеет цель минимизации тех изменений, которые могут произойти с кларковыми концентрациями химических элементов, вызванных естественными геологическими изменениями в данном регионе. Анализ результатов по I_{geo} представлен в таблице 2, согласно которым выявлена высокая категория загрязнения (VI) исследуемых почв с удалённостью 3 км для всех рассмотренных элементов, за исключением марганца. По мере удаления от источника загрязнения отмечается снижение категории загрязнённости до I класса.

Применение при расчётах геоэкологических коэффициентов значений кларков химических элементов в качестве постоянной величины содержания последних направлено на отделение абиотического содержания ТМ от его антропогенного составляющего в поверхностном горизонте почв. Конечно, при оценке техногенной нагрузки ТМ на ОС активно применяются значения ПДК, установленные для почвенного слоя. Но здесь может скрываться такой антропогенный фактор, как влияние атмосферных поллютантов, которые в течение времени оседают на поверхность почвы, в особенности по направлению розы ветров. А источником воздушного загрязнения ТМ в ОС могут быть дымовые или газообразные выбросы, а также пылевые выбросы из хранилищ или отходов и т. д.

Содержание ТМ в растениях, индекс мобильности и коэффициент биологического накопления ТМ. Проведённые исследования

показали, что для всех растений в пределах одной экспериментальной площадки содержание отдельных ТМ статистически не различается и может быть усреднено (табл. 3).

Высокое содержание ТМ определено в образцах растений с экспериментального участка вблизи АГМК (3 км). Далее, по мере удаления от АГМК, наблюдалось значительное снижение содержания ТМ в образцах всех растений. При этом вегетативные и генеративные органы растений с разной интенсивностью накапливали ТМ. К примеру, у картофеля и свёклы содержание всех исследуемых ТМ в ботве в среднем в два раза превышало их содержание в клубнях. А в остальных растениях (морковь, перец и баклажан) отмечено в среднем трехкратное повышенное содержание ТМ в листьях по сравнению с их корнеплодами и плодами (табл. 3). Однако для всех растений отмечается общая закономерность. По мере удаления от комбината разница в содержании ТМ в различных органах одного и того же растения сохранилась на самых удалённых экспериментальных участках (30 км). Данные изменения содержания ТМ в биологическом материале могут быть обусловлены геохимическими особенностями почв рассмотренных участков, которые составляют верхнюю часть осадочных пород, и снижением фактора воздушного переноса в зоне распространения преобладающих ветров. В таком ключе содержание ТМ в почве может быть не вполне реальным показателем их доступности для

Таблица 3 / Table 3

Содержание тяжёлых металлов в овощах (мг/кг) в зоне техногенеза Алавердского горно-металлургического комбината с учётом розы ветров
Heavy metals concentration in plants (mg/kg) in the technogenesis zone of the Alaverdi copper smelting enterprise, taking into account the wind rose

Варианты опыта Experience options	Удалённость от источника загрязнения в северо-восточном направлении, км Distance from the source of pollution in a north-easterly direction, km															
	3					10					30					
	Cu	Pb	Mo	Zn	Co	Cu	Pb	Mo	Zn	Co	Cu	Pb	Mo	Zn	Co	
Картофель <i>Solanum tuberosum</i> L.	1	70,5	68,4	10,5	314,0	6,5	46,1	54,5	1,8	115,0	1,4	30,0	1,1	0,4	100,2	0,2
	2	34,5	41,7	3,4	197,0	3,7	27,5	38,1	0,8	81,0	0,5	2,9	0,1	0,1	32,8	0,1
Свёкла <i>Beta vulgaris</i> L.	1	51,0	101,6	6,7	3124,3	4,9	56,4	71,2	4,0	68,7	1,3	20,5	2,3	0,7	74,4	0,5
	2	38,9	36,8	3,7	169,0	2,1	31,4	37,8	2,0	60,4	0,9	4,5	0,5	0,5	21,7	0,7
Морковь <i>Daucus carota</i> L.	3	77,0	131,0	4,3	220,6	4,4	47,3	37,2	1,3	104,0	1,8	13,8	3,6	0,2	60,5	0,18
	4	25,7	20,8	1,2	25,7	1,0	25,7	10,3	11,9	44,3	0,8	1,1	0,9	0,1	2,9	0,03
Перец <i>Capsicum annum</i> L.	3	68,2	85,2	6,9	83,0	3,3	35,5	48,2	1,9	61,1	1,0	9,4	2,2	0,7	13,1	0,4
	5	29,3	19,3	1,2	26,7	1,0	14,6	17,4	0,9	44,4	0,9	3,0	0,9	0,1	3,3	0,02
Баклажан <i>Solanum melongena</i> L.	3	62,5	85,2	4,9	154,6	4,9	46,0	43,5	0,9	67,9	0,8	16,9	2,4	0,9	33,9	0,3
	5	27,3	27,4	2,0	84,9	10,8	20,4	14,9	0,8	19,5	0,4	4,2	0,9	0,2	4,7	0,1

Примечание: 1 – ботва; 2 – клубни; 3 – листья; 4 – корнеплоды; 5 – плоды.
Note: 1 – tops; 2 – tubers; 3 – leaves; 4 – roots; 5 – fruits.

Таблица 4 / Table 4

Значения индекса мобильности (I_m) и коэффициента биологического накопления ($K_{\text{он}}$) в овощах, выращенных в зоне влияния Алавердского горно-металлургического комбината
 Mobility index (I_m) and biological accumulation factor (K_{ba}) in vegetables grown in the technogenesis zone of the Alaverdi copper smelting enterprise

Растение Plant	Коэффициент Coefficient	Удалённость от источника загрязнения в северо-восточном направлении, км Distance from the source of pollution in a north-easterly direction, km														
		3					10					30				
		Cu	Pb	Mo	Zn	Co	Cu	Pb	Mo	Zn	Co	Cu	Pb	Mo	Zn	Co
Картофель <i>Solanum tuberosum</i> L.	I_m / I_m	2,04	1,64	3,09	1,59	1,76	1,68	1,43	2,25	1,42	2,82	10,34	10,06	6,08	3,05	2,57
	$K_{\text{он}} / K_{\text{ба}}$	0,08	0,16	0,27	1,16	0,16	0,47	0,14	0,05	0,44	0,03	0,47	0,03	0,16	1,98	0,01
Свёкла <i>Beta vulgaris</i> L.	I_m / I_m	1,31	2,76	1,81	18,49	2,33	1,80	1,88	2,03	1,14	1,44	4,56	4,69	1,46	3,43	0,74
	$K_{\text{он}} / K_{\text{ба}}$	0,07	0,20	0,22	7,46	0,11	0,56	0,83	1,45	1,42	0,08	0,35	0,06	0,47	1,43	0,06
Морковь <i>Daucus carota</i> L.	I_m / I_m	3,00	6,3	3,58	8,58	4,42	1,84	3,61	0,11	2,35	2,20	12,55	3,91	2,63	20,86	6,06
	$K_{\text{он}} / K_{\text{ба}}$	0,08	0,22	0,11	0,56	0,08	0,46	0,36	3,18	1,63	0,11	0,21	0,13	0,11	0,94	0,01
Перец <i>Capsicum annum</i> L.	I_m / I_m	2,33	4,41	5,75	3,11	3,33	2,43	2,77	2,04	1,38	1,09	3,13	2,44	6,73	3,97	25,63
	$K_{\text{он}} / K_{\text{ба}}$	0,08	0,15	0,16	0,25	0,07	0,32	0,5	0,68	1,16	0,07	0,18	0,07	0,33	0,24	0,02
Баклажан <i>Solanum melongena</i> L.	I_m / I_m	2,29	3,11	2,45	1,82	0,45	2,25	2,92	1,06	3,48	2,27	4,02	2,76	5,47	7,21	5,20
	$K_{\text{он}} / K_{\text{ба}}$	0,08	0,15	0,16	0,25	0,07	0,42	0,44	0,42	0,96	0,05	0,32	0,07	0,42	0,57	0,01

растений. Исходя из этого, коэффициенты накопления ТМ в растениях были рассчитаны на основе доступности данного химического элемента и его поглощения конкретным растением [32]. При расчёте индекса мобильности (I_m) для ближних экспериментальных участков (3 км) были установлены следующие ряды для каждого из растений (по табл. 4): картофель – Mo > Cu > Co > Pb > Zn; свёкла – Zn > Pb > Co > Mo > Cu; морковь – Zn > Pb > Co > Mo > Cu; перец – Mo > Pb > Zn > Co > Cu; баклажан – Pb > Mo > Cu > Zn > Co. На более удалённых участках (30 км) в сравнительных рядах имеют место небольшие изменения: картофель – Cu > Pb > Mo > Zn > Co; свёкла – Pb > Cu > Zn > Mo > Co; морковь – Zn > Cu > Co > Pb > Mo; перец – Co > Mo > Zn > Cu > Pb; баклажан – Zn > Mo > Cu > Co > Pb.

Отмеченные изменения могут быть связаны с повышенным содержанием валовых форм ТМ в образцах почв по сравнению с их подвижными формами согласно полученным результатам (табл. 1). Данный факт говорит о доступности валовых форм ТМ в почве при их поглощении и накоплении растениями.

Сравнение значения коэффициента биологического накопления ($K_{\text{он}}$) ТМ в исследуемых растениях позволяет выявить следующее (табл. 4). Для всех пяти видов растений, выращенных на участках вблизи от комбината с удалённостью 3 км, по Cu и Co в среднем значение $K_{\text{он}}$ соста-

вило 0,09, а по Mo и Pb было в два раза больше (0,18). В случае же с цинком значение $K_{\text{он}}$ было наибольшим у свёклы (7,46), а наименьшим – у перца и баклажана (0,25). Для всех растений, выращенных на более отдалённых участках (30 км), значения коэффициента биологического накопления по Pb и Co в среднем были равны 0,04, а по меди – в среднем 0,3. В случае с Mo и Zn выявлены растения как с наименьшим значением (соответственно, морковь – 0,11 и перец – 0,24), так и с наибольшим (баклажан – 0,42 и картофель – 1,98) значением $K_{\text{он}}$.

Полученные результаты указывают на отличие процессов поглощения и накопления ТМ растениями. Известно, что молибден присутствует в почвах в виде анионов и, несомненно, нуждается в активном транспорте через плазмалемму клеток корней растений для поглощения [33]. А остальные ТМ для высших растений обычно поглощаются в виде двухвалентных ионов через каналы, которые специфичны для каждого элемента, либо гомеостаз достигается за счёт специфических механизмов активной экскреции, которые контролируются цитоплазматическими концентрациями [34].

Заключение

Тяжёлые металлы являются токсичными и загрязняющими веществами для живых

организмов и ОС, а горнодобывающая деятельность считается одной из основных причин выброса токсичных элементов в ОС. Но угрозу могут представлять предприятия, которые работают не в полную мощность. Остаётся фактом то, что эколого-токсикологические изменения в ОС, вызванные работой подобных предприятий, продолжают оставаться прямой угрозой для живых организмов. Анализ основных полученных результатов показал, что по валовому содержанию ТМ в образцах почвы на выделенных участках вблизи АГМК (3 км) представляются сравнительным рядом $Cu > Pb > Zn > Co > Mn$, в котором сохраняется для подвижных форм тех же ТМ, но уже с многократным уменьшением их содержания. По содержанию Cu , Pb , Zn и Co значение степени их подвижности в образцах почвы вблизи АГМК (3 км) в среднем составляло 15,5%, в случае с марганцем – 25,5%. На более дальних расстояниях (30 км), по направлению розы ветров для данного региона, максимальная степень подвижности была у Cu , Co и Mn (в среднем 14,3%), возможно, это обусловлено увеличением валовых содержаний ТМ по сравнению с их подвижными формами. Рассчитанные геоэкологические коэффициенты позволяют выявить степень антропогенной нагрузки на протяжении выбранного направления с учётом значений кларков ТМ. Оценка накопительной активности исследуемых ТМ растениями выявила, что вегетативные и генеративные органы растений с разной интенсивностью накапливали ТМ. Однако, по мере удаления от комбината, разница в содержании ТМ в различных органах одного и того же растения сохраняется на самых удалённых экспериментальных участках (30 км). При расчёте индекса мобильности ТМ для каждого растения, выращенного на ближних экспериментальных участках (3 км), получены сравнительные ряды: картофель – $Mo > Cu > Co > Pb > Zn$; свёкла – $Zn > Pb > Co > Mo > Cu$; морковь – $Zn > Pb > Co > Mo > Cu$; перец – $Mo > Pb > Zn > Co > Cu$; баклажан – $Pb > Mo > Cu > Zn > Co$. На более удалённых участках (30 км) в представленных сравнительных рядах имеют место небольшие изменения, что может быть связано с повышенным содержанием валовых форм ТМ в образцах почв по сравнению с их подвижными формами. Данный факт говорит о доступности валовых форм ТМ в почве при их поглощении и накоплении растениями.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета по науке РА в рамках науч-

ного проекта № 21Т-2Н216 «Оценка геоэкологических рисков многокомпонентного воздействия техногенного загрязнения природнопочвенных поясов РА и разработка комплексных мер по их предотвращению».

References

1. Cimboláková I., Uher I., Laktičová K.V., Vargová M., Kimáková T., Papajová I. Heavy metals and the environment // Environmental factors affecting human health [Internet resource] <https://www.intechopen.com/chapters/69435> (Accessed: 08.10.2019). doi: 10.5772/intechopen.86876
2. Nagajyoti P.C., Lee K.D., Sreekanth T.V.M. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review // Environ. Chem. Lett. 2010. V. 8. P. 199–216. doi: 10.1007/s10311-010-0297-8
3. Surbakti E.P., Iswantari A., Effendi H.D., Sulistiono S. Distribution of dissolved heavy metals Hg, Pb, Cd, and As in Bojonegara Coastal Waters, Banten Bay // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2021. V. 744. Article No. 012085. doi: 10.1088/1755-1315/744/1/012085
4. Nguyen Van T., Ozaki A., Nguyen Tho H., Nguyen Duc A., Tran Thi Y., Kurosawa K. Arsenic and heavy metal contamination in soils under different land use in an Estuary in Northern Vietnam // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2016. V. 13. No. 11. Article No. 1091. doi: 10.3390/ijerph13111091
5. Skugoreva S.G., Ashihmina T.Ya., Fokina A.I., Lyalina E.I. Chemical groups of toxic effect of heavy metals (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2016. No. 1. P. 4–13 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2016-1-014-019
6. Sukiasyan A. Influence of heavy metals content in water of small rivers used for irrigation of maize of Armenian population // Theoretical and Applied Ecology. 2018. No. 4. P. 40–45 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-4-040-045
7. Sukiasyan A.R., Kroyan S.Z., Skugoreva S.G., Kirakosyan A.A., Ghazaryan H.Gh. Consequences of the impact of some industrial plants on the content of heavy metals in soils // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 4. P. 90–97 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-4-090-097
8. Hunanyan S.A. Accumulation of heavy metals in vegetable crops in the environs of technogenic zones of Alaverdi, Lori Marz of RA // Proceedings of Agrarian Science. 2012. V. 10. No. 3. P. 104–108 (in Russian).
9. Gill M. Heavy metal stress in plants: a review // Int. J. Adv. Res. 2014. V. 2. No. 6. P. 1043–1055.
10. Minkina T.M., Motuzova G.V., Mandzhieva S.S., Nazarenko O.G. Ecological resistance of the soil-plant system to contamination by heavy metals // Journal of Geochemical Exploration. 2012. V. 123. P. 33–40. doi: 10.1016/j.gexplo.2012.08.021
11. Sukiasyan A.R. Comparative analysis of heavy metals accumulation in the soil-plant system by the geo-

- accumulation index and transpiration rate of *Zea mays* L. // RUDN Journal of Ecology and Life Safety. 2019. V. 27. No. 1. P. 39–50 (in Russian). doi: 10.22363/2313-2310-2019-27-1-39-50
12. Seth C.S., Misra V., Chauhan L.K.S. Accumulation, detoxification, and genotoxicity of heavy metals in Indian mustard (*Brassica juncea* L.) // Int. J. Phytoremediation. 2012. V. 14. No. 1. P. 1–13. doi: 10.1080/15226514.2011.555799
13. Riyazuddin R., Nisha N., Ejaz B., Khan M.I.R., Kumar M., Ramteke P.W., Gupta R. A comprehensive review on the heavy metal toxicity and sequestration in plants // Biomolecules. 2022. V. 12. No. 1. Article No. 43. doi: 10.3390/biom12010043
14. Patra M., Bhowmik N., Bandopadhyay B., Sharma A. Comparison of mercury, lead and arsenic with respect to genotoxic effects on plant systems and the development of genetic tolerance // Environmental and Experimental Botany. 2004. V. 52. No. 3. P. 199–223. doi: 10.1016/j.envexpbot.2004.02.009
15. Tuakuila J., Lison D., Lantin A.C., Mbuyi F., Deumer G., Haufroid V., Hoet P. Worrying exposure to trace elements in the population of Kinshasa, Democratic Republic of Congo (DRC) // Int. Arch. Occup. Environ. Health. 2012. V. 85. No. 8. P. 927–939. doi: 10.1007/s00420-012-0733-0
16. Firsova L.P. Processes of adsorption, desorption, and filtration of radiocerium solutions in soil // Moscow University Chemistry Bulletin. 2001. V. 42. No. 1. P. 66–70 (in Russian).
17. Cheng S. Effects of heavy metals on plants and resistance mechanisms // Environ. Sci. Pollut. Res. 2003. V. 10. P. 256–264. doi: 10.1065/espr2002.11.141.2
18. Ghori N.-H., Ghori T., Hayat M.Q., Imadi S.R., Gul A., Altay V., Ozturk M. Heavy metal stress and responses in plants // Int. J. Environ. Sci. Technol. 2019. V. 16. P. 1807–1828. doi: 10.1007/s13762-019-02215-8
19. Chileshe M.N., Syampungani S., Festin E.S., Tigabu M., Daneshvar A., Odén P.C. Physico-chemical characteristics and heavy metal concentrations of copper mine wastes in Zambia: implications for pollution risk and restoration // Journal of Forestry Research. 2020. V. 31. P. 1283–1293. doi: 10.1007/s11676-019-00921-0
20. Sukiasyan A.R., Kirakosyan A.A. Heavy metal pollution of river waters and coastal soils adjacent to the tailing storage facility territory // Water and Ecology: Problems and Solutions. 2020. No. 3 (83). P. 79–84 (in Russian). doi: 10.23968/2305–3488.2020.23.3.79-85
21. Dzhugaryan O.A. Plants as indicators and biomonitors of atmospheric pollution // Nature, City, Man. Yerevan, 1987. P. 260–262.
22. Soil resources of Mediterranean and Caucasus countries / Eds. Y. Yigini, P. Panagos, L. Montanarella. Luxembourg: Publications Office of the EU, 2013. 243 p. doi: 10.2788/91322
23. Vazhenin I.G. Diagnostics of soil fertility subjected to technogenic pollution // Bulletin. Soil Institute named after V.V. Dokuchaev. 1987. V. 40. P. 30–32.
24. Grechko V., Petrlik J., Matuščík J., Strakova J., Zarafyan I., Dulgaryan O., Amiragyan J., Aslanyan G. Mapping the distribution of heavy metals and persistent organic pollutants in the mining and industrial areas of the Tumanyan and Stepanavan regions. Lori Province. Republic of Armenia, 2018–2021 (Heavy metals and POPs in Lori Marz, Armenia. Results of research 2018–2021). 2021. 55 p. (in Russian).
25. Hunanyan S.A., Jhangiryan T.A., Mkrtchyan A.L. Influence of technogenic emissions of the AGMZ on the ecological toxicological state of the agroecosystems of the Debet River basin, RA // Evropeyskiy Soyuz Uchenykh. 2020. V. 6. No. 75. P. 26–30 (in Russian). doi: 10.31618/ESU.2413-9335.2020.6.75.872
26. Jhangiryan T.A. The content of several heavy metals and nutrients in some nutritive plants growing in the areas adjacent to the Drumbon and Kashen ores // Biological Journal of Armenia. 2021. V. 3. No. 73. P. 109–115 (in Armenian).
27. Sukiasyan A.R. New approach to determining the environmental risk factor by the biogeochemical coefficients of heavy metals // South of Russia: ecology, development. 2018. V. 13. No. 4. P. 108–118 (in Russian). doi: 10.18470/1992-1098-2018-4-108-118
28. Kasimov N.S., Vlasov D.V. Clarkes of chemical elements as comparison standards in ecogeochemistry // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya. 2015. No. 2. P. 7–17 (in Russian).
29. Müller G. Die Schwermetallbelastung der sedimente des Neckars und seiner Nebenflüsse: Eine Bestandsaufnahme // Chemical Zeitung. 1981. V. 105. P. 157–164.
30. Alaverdi meteorological archive, Lori Region, Armenia [Internet resource] <https://www.meteoblue.com/ru> (Accessed: 24.08.2023).
31. Kirakosyan A.A., Sukiasyan A.R. Using MATLAB as an express method for evaluating experimental results // International Youth Conference: Information Technologies. Yerevan, 2005. P. 34–37 (in Russian).
32. Tukura B.W., Anhwange B.A., Mohammed Y., Usman N.L. Translocation of trace metals in vegetable crops grown on irrigated soil along Mada River, Nasarawa State, Nigeria // International Journal of Modern Analytical and Separation Sciences. 2012. V. 1. No. 1. P. 13–22.
33. Stangoulis J.C.R., Reid R.J., Brown P.H., Graham R.D. Kinetic analysis of boron transport in Chara // Planta. 2001. V. 213. No. 1. P. 142–146. doi: 10.1007/s004250000484
34. Welch R.M., Shuman L. Micronutrient nutrition of plants // Crit. Rev. Plant Sci. 1995. V. 14. No. 1. P. 49–82. doi: 10.1080/07352689509701922

Плёночные материалы на основе желатина, содержащие растительные экстракты

© 2023. Е. С. Широкова, к. х. н., доцент,
Е. В. Товстик, к. б. н., доцент, с. н. с., А. И. Фокина, к. б. н., доцент,
Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
e-mail: usr06779@vyatsu.ru

Разработка экологичных и безопасных плёночных материалов на биооснове является перспективным направлением в области производства упаковки, в медицине и сельском хозяйстве. Среди биоразлагаемых полимеров на биооснове наибольший интерес вызывают композиции на основе желатина. В данном исследовании представлены результаты исследования плёнок на основе желатина с включением водных экстрактов из листьев облепихи, подорожника большого, хвои сосны. Плёнки получали методом полива из раствора, приготовленного на растительных экстрактах и дистиллированной воды в качестве контроля. Водные экстракты из растительного сырья получали в режиме отвара. С помощью физико-химических методов анализа определён качественный и количественный состав полифенольных соединений (сумма полифенолов, флавоноиды и дубильные вещества), входящих в состав экстрактов. Установлена антиоксидантная активность растительных экстрактов. Наибольшее количество антиоксидантов (64 мг/100 см³) выявлено в экстрактах из листьев облепихи. Введение в состав желатиновых плёнок растительных экстрактов не вызывало существенных изменений в их термической стабильности, что подтверждено данными термогравиметрического анализа. Существенные изменения свойств по сравнению с контролем отмечены для образцов, содержащих экстракт листьев облепихи. Так, значение напряжения при разрыве составило 11,6 МПа, а удлинение при разрыве – 100% (11,4 МПа и 65% для контроля соответственно). Для всех исследованных образцов отмечено меньшее водопоглощение (200–223% по истечении 60 мин) по сравнению с контролем (254% по истечении 60 мин) и значения паропроницаемости, сопоставимые с контролем. Такое сочетание свойств плёнок совместно с высоким содержанием антиоксидантов в составе растительных экстрактов позволяет рассматривать данные материалы как перспективные для создания биоразлагаемой упаковочной плёнки, в том числе обладающей антибактериальной активностью.

Ключевые слова: подорожник большой, облепиха крушиновидная, сосна обыкновенная, полифенолы, биоразлагаемые полимеры.

Gelatin films containing plant extracts

© 2023. E. S. Shirokova ORCID: 0000-0001-5735-3489[?]
E. V. Tovstik ORCID: 0000-0003-1861-6076[?]
A. I. Fokina ORCID: 0000-0001-8265-8882[?]
Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
e-mail: usr06779@vyatsu.ru

Polymer films based on traditional synthetic polymers are widely used throughout the world. However, the impossibility of biodegradation of synthetic polymers in the environment and, as a result, the accumulation of polymeric waste stimulates using biodegradable bio-based polymers instead of traditional ones. One of them is gelatin. Gelatin is biodegradable, it has good mechanical and barrier properties, high film forming ability and widely distributed.

Presented research includes results of a investigation of gelatin films based on aqueous extracts from the leaves of sea buckthorn leaves, plantain leaves, pine needles (film based on distilled water used as a control). The qualitative and quantitative composition of polyphenolic compounds (the sum of polyphenols, flavonoids and tannins) that make up the extracts was determined using physico-chemical methods of analysis. The antioxidant activity of plant extracts has been established. The highest amount of antioxidants (64 mg/100 cm³) was found in extracts from sea buckthorn leaves. Using plant extracts in the composition of gelatin films did not cause significant changes in their thermal stability; it was confirmed by thermogravimetric analysis. Significant changes in properties compared to the control were noted for samples containing sea buckthorn leaf extract. Thus, the value of the stress at break was 11.6 MPa, and the elongation at break was 100% (11.4 MPa and 65% for control, respectively). For all the studied samples,

there was a lower water absorption (200–223% after 60 minutes) compared to the control (254% after 60 minutes) and vapor permeability values comparable to the control. Such combination of film properties, with a high content of antioxidants in plant extracts, allows us to consider these materials as promising for the creation of biodegradable packaging films with antibacterial activity.

Keywords: *Plantago major* L., *Hippophae rhamnoides* L., *Pinus sylvestris* L., polyphenols, biodegradable polymers.

Полимерные плёночные материалы широко применяются во всём мире для упаковки пищевых и непищевых продуктов, в строительстве, сельском хозяйстве и медицине. В настоящее время большая их часть производится из полимерных материалов, получаемых из ископаемого сырья. Однако невозможность биодegradации (разложения) большинства синтетических полимеров в окружающей среде и, как следствие, накопление полимерных отходов, а также ограниченность запасов ископаемого сырья, стимулируют интерес к использованию биоразлагаемых полимеров на биооснове взамен традиционных.

В качестве полимеров на биооснове выделяют белки, полисахариды и липиды. Среди белков перспективным материалом является желатин [1], представляющий собой продукт денатурации коллагена, получаемого в основном от крупного рогатого скота, свиней и рыб. Желатин обладает хорошей плёнкообразующей способностью, биосовместимостью; он нетоксичен, имеет повсеместное распространение, прозрачен, а также может использоваться в качестве носителя различных соединений и добавок [2].

Модификация желатина путём включения в его состав различных соединений позволяет получать материалы с подходящими механическими, барьерными, антиоксидантными и противомикробными свойствами, которые могут быть использованы в производстве упаковок [3], в медицине [4], в производстве плёнки для мульчирования и для производства продуктов питания [5].

К наиболее экологичным и безопасным добавкам, позволяющим модифицировать биоразлагаемые полимеры, относят полифенольные вещества [6]. Их потенциальным источником выступают растительные экстракты.

Облепиха крушиновидная является широко распространённым растением, известна как ценное лекарственное и пищевое сырьё. В промышленных масштабах в большей степени используются ягоды облепихи. При этом листья облепихи, по сравнению с плодами, содержат больше полифенольных веществ. В настоящее время предлагается использовать экстракты из листьев облепихи в качестве

нетоксичных агентов для сшивания биополимеров [7]. Наряду с облепихой, в качестве источников ценных БАВ (антиоксиданты, флавоноиды и т. д.) давно зарекомендовали себя такие распространённые растения, как подорожник большой и сосна обыкновенная [8, 9].

Целью данной работы являлась оценка применимости экстрактов из облепихи крушиновидной, листьев подорожника большого и хвои сосны обыкновенной для модификации плёночных материалов на основе желатина.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования служили неочищенные водные экстракты из листьев облепихи крушиновидной (*Hippophae rhamnoides* L.), подорожника большого (*Plantago major* L.), хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), а также желатиновые плёнки на их основе.

Приготовление и анализ растительных экстрактов. Растительное сырьё измельчали в лабораторной мельнице, пропускали через сито с диаметром отверстий 1 мм. Водные экстракты получали в режиме отвара: 30 мин на кипящей водяной бане, 15 мин при комнатной температуре. Соотношение сырьё : дистиллированная вода составляло 1 : 20. Водный экстракт фильтровали через бумажный фильтр «синяя лента».

Определение концентрации полифенольных соединений проводили спектрофотометрическим методом с реактивом Фолина-Чокальтеу по методике, изложенной в ГОСТ Р 55488-2013. В качестве внутреннего стандарта использовали галловую кислоту [10]. Профиль полифенольных соединений исследовали с помощью общепринятых качественных реакций [11].

Для количественного определения флавоноидов использовали методику по ГОСТ 13399-89, основанную на способности их окрашенных комплексов с хлоридом алюминия поглощать монохроматический свет при длине волны 410 нм. В качестве внутреннего стандарта использовали рутин. Определение антиоксидантной активности и содержания дубильных веществ по ОФС.1.5.3.0008.18 проводили методом титриметрии [12]. Стан-

дартизацию раствора перманганата калия проводили по кверцетину.

Содержание экстрактивных веществ определяли гравиметрическим методом. Для сухих экстрактов снимали ИК-спектры на ИК-Фурье-спектрометре «Инфралюм ФТ-801» (ООО НПФ «СИМЕКС», Россия).

Приготовление плёнкообразующих растворов и плёнкообразование. Приготовление плёнкообразующих растворов осуществляли по технологии [13]. Желатин марки П-11 в количестве 10 масс. % растворяли в дистиллированной воде (контроль) или заранее приготовленном растительном экстракте. Смесь нагревали на водяной бане при температуре 45 °С до полного растворения в течение 30 мин. В приготовленную смесь добавляли глицерин (в качестве пластификатора) в количестве 5 масс.%, смесь перемешивали. Для удаления пузырьков воздуха раствор отстаивали в течение 30 мин в термостате при температуре 37 °С. Полученные растворы отливали в формы размером 20,0 × 2,5 см по 10 см³. Полученные плёнки сушили при комнатной температуре (20±2 °С) и относительной влажности воздуха 40±5%. Высушенные плёнки перед испытанием кондиционировали в эксикаторе над силикагелем в течение 72 ч.

Характеристика плёнок. Регистрацию спектров поглощения исследуемых плёнок в ближней и средней ИК области проводили с помощью ИК-Фурье-спектрометра «Инфралюм ФТ-801» (ООО НПФ «СИМЕКС», Россия) с последующей идентификацией функциональных групп. Измерения проводили при комнатной температуре.

Толщину полученных плёнок определяли толщиномером индикаторным ТН 10-60 с точностью до 0,01 мм не менее чем в пяти точках с последующим расчётом среднего значения.

Температурные характеристики полученных плёнок оценивали с помощью термического анализатора (ТГ/ДТА) DTG-60 («Shimadzu», Япония). Измерения проводили в атмосфере воздуха (150 см³/мин) в платиновых тиглях. Масса образцов для испытания составляла 2,35±0,35 мг; оксид алюминия использовали в качестве эталона. Температурная программа: нагрев со скоростью 10 °С/мин от комнатной температуры до 550 °С.

Исследование эксплуатационных свойств плёнок. Прочность при растяжении и удлинение при разрыве каждой плёнки оценивали на разрывной машине AG-X5 («Shimadzu», Япония) при температуре (23±2) °С и скорости движения активного захвата 100 мм/мин.

Для исследования готовили образцы плёнок размером 1 × 5 см; образцы растягивали в вертикальном направлении; в ходе испытания фиксировали напряжение и удлинение при разрыве. Испытания проводили на 5 образцах и рассчитывали средние значения.

Водопоглощение плёнок изучали по характеру их набухания в воде гравиметрическим методом. Плёнку размером 1,0 × 1,0 см помещали на капроновую сетку и, предварительно определив их исходную массу на аналитических весах, опускали в ёмкость, наполненную дистиллированной водой. Повторное взвешивание сетки с плёнкой проводили через 15, 30, 45, 60 мин после начала опыта. Параллельно определяли массу пустой сетки (контроль) до и после её пребывания в воде в течение того же промежутка времени, что и в опыте с плёнкой. Измерения проводили в четырёхкратной повторности [14].

Паропроницаемость плёнок определяли гравиметрическим методом. Образцы плёнок с целостной структурой закрепляли с помощью парафильма на горлышке стеклянных пробирок с 2 см³ дистиллированной воды. Систему взвешивали, помещали в эксикатор над силикагелем. Повторное взвешивание проводили через 24, 48 и 72 ч после начала опыта. Измерения проводили в трёхкратной повторности [14].

Статистическую обработку результатов всех измерений проводили согласно ГОСТ Р 8.736-2011. Статистическую значимость различий между средними значениями устанавливали при $p < 0,05$. Данные выражали как среднее значение ± стандартное отклонение. Взаимосвязь исследуемых показателей оценивали с помощью ранговых коэффициентов корреляции Спирмена (r). Расчёты выполняли в программе Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

Характеристика растительных экстрактов. Исследование содержания и спектра полифенольных веществ в составе растительных экстрактов представляло интерес с точки зрения их антиоксидантных свойств, а также потенциала включения в состав плёнок в качестве биоконсервантов и антибактериальных агентов [15].

В ходе сравнительной оценки было выявлено, что экстракты из листьев облепихи содержат в 2,8 и 3,3 раза больше полифенолов, чем из хвои сосны и листьев подорожника (табл. 1).

В результате качественного анализа состава фенольных соединений в исследуемых экстрактах были выявлены флавонолы, флавононы, флавоноиды и кумарины в зависимости от вида растительного сырья (табл. 2).

Экстракты из листьев облепихи отличались наличием антоцианов, а хвои – халконов и ауранов.

Наибольшее содержание флавоноидов обнаружено в экстрактах из листьев облепихи (18,29 мкг/см³). Различия с листьями подорожника и хвоей сосны составило в 2,3 и 7,6 раза соответственно (табл. 1).

Наряду с флавоноидами, во всех исследованных экстрактах были идентифицированы дубильные вещества. Наибольшее их содержание (3,33 мг/см³) отмечено для листьев облепихи. В экстрактах из листьев подорожника и хвои сосны их содержание было ниже, чем в листьях облепихи, в 5,0 и 2,6 раза соответственно. Поскольку одним из наиболее известных свойств полифенолов является их антиоксидантная активность, особый интерес представляла оценка значения данного показателя в исследуемых раститель-

ных экстрактах. Так, в случае экстрактов из листьев облепихи регистрируемые значения антиоксидантной активности были в 2,3 и 2,1 раза выше, чем из листьев подорожника и хвои соответственно.

В целом по сумме экстрактивных веществ, содержащихся в экстрактах, исследуемое растительное сырьё можно расположить в следующий ряд: листья подорожника < листья облепихи < хвоя сосны.

Наличие в составе исследуемых экстрактов веществ фенольной природы подтверждалось результатами ИК-Фурье-спектроскопии. На ИК-спектрах (рис. 1) порошков изучаемых экстрактов выделялись широкие полосы поглощения [16] в интервале 3800–3000 см⁻¹ (3750–3700 см⁻¹ – полосы поглощения, обусловленные валентными колебаниями свободных гидроксильных групп; 3400–3200 см⁻¹ – полосы поглощения, обусловленные внутри- и межмолекулярными водородными связями; 3385–2850 см⁻¹ – полосы поглощения, характерные для ароматической части флавоноидов; 3300–2500 см⁻¹ – полосы поглощения, обусловленные связанными гидроксогруппами);

Таблица 1 / Table 1

Состав и характеристика растительных экстрактов
Composition and characteristics of plant extract

Показатель Index	Растительное сырьё / Plant materials		
	листья облепихи sea buckthorn leaves	листья подорожника большого plantain leaves	хвоя сосны pine needles
Полифенольные соединения, мг/см ³ Polyphenolic compounds, mg/cm ³	3,35±0,30	1,02±0,10	1,18±0,18
Флавоноиды, мкг/см ³ Flavonoids, µg/cm ³	18,29±0,11	7,91±0,03	2,42±0,12
Дубильные вещества, мг/см ³ Tanins, mg/cm ³	3,33±0,30	0,665±0,010	1,30±0,13
Антиоксиданты, мг/100 см ³ Antioxidants, mg/100 cm ³	64±6	28,1±2,8	30,0±3,0
Экстрактивные вещества, мг/см ³ Extractives, mg/cm ³	10,9±0,11	12,1±1,2	6,2±0,6

Таблица 2 / Table 2

Качественный состав фенольных соединений водных экстрактов
Qualitative composition of phenolic compounds in aqueous extracts

Растительное сырьё Plant materials	Группа полифенольных соединений* Group of polyphenolic compounds*						
	1	2	3	4	5	6	7
Листья облепихи / Sea buckthorn leaves	+	+	+	+	–	–	–
Листья подорожника большого / Plantain leaves	+	+	+	–	–	–	+
Хвоя сосны / Pine needles	+	+	+	–	+	+	+

Примечание: 1 – флавонолы, 2 – флавононы, 3 – флавоноиды, 4 – антоцианы, 5 – халконы, 6 – аураны, 7 – кумарины.

Note: * 1 – flavonols, 2 – flavonones, 3 – flavonoids, 4 – anthocyanins, 5 – chalcones, 6 – aurons, 7 – coumarins.

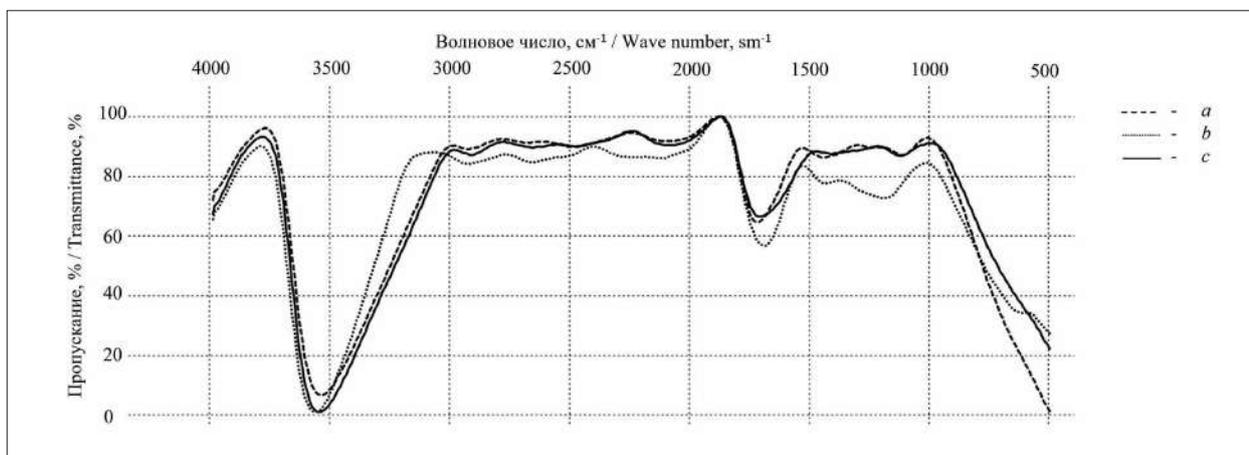


Рис. 1. ИК-спектры экстрактов листьев облепихи (а), листьев подорожника большого (b) и хвои сосны (с)

Fig. 1. IR-spectrum of sea buckthorn leaves (a), plantain leaves (b) and pine needles (c)

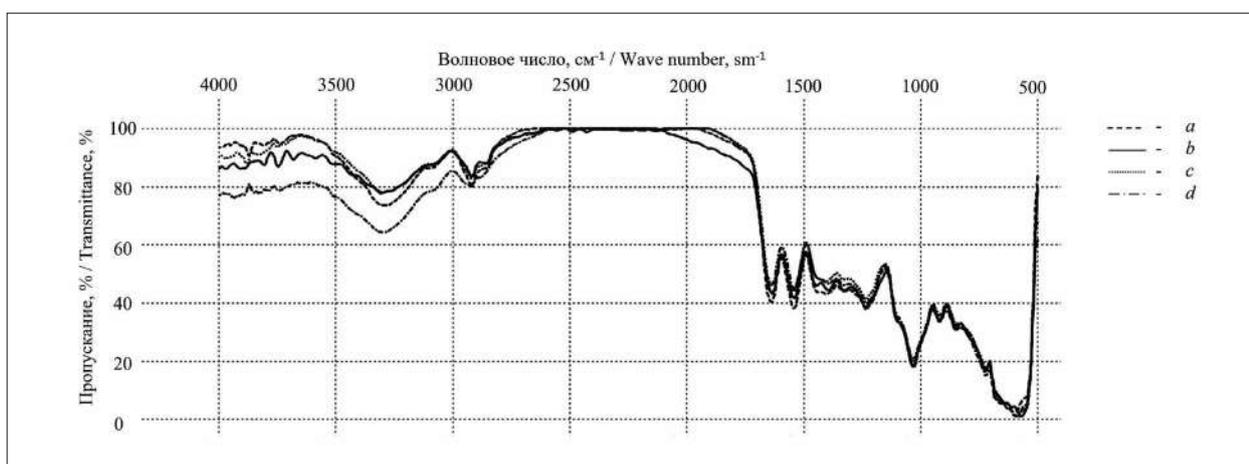


Рис. 2. ИК-спектры контроля (а) и плёнок, содержащих экстракт листьев облепихи (b), листьев подорожника большого (с) и хвои сосны (d)

Fig. 2. IR-spectra of control (a) and films containing extract of sea buckthorn leaves (b), plantain leaves (c) and pine needles (d)

1860–1500 cm^{-1} связаны с наличием колебания $\text{C}=\text{O}$ -групп.

Однако следует отметить, что использование ИК-Фурье-спектроскопии в анализе экстрактов ограничено в связи с их многокомпонентностью.

Характеристика плёнок на основе желатина с включением растительных экстрактов. ИК-спектры плёнок, приготовленных на основе желатина с включением экстрактов из растительного сырья, в большей степени были идентичны спектрам контроля. Изменения в спектрах опытных вариантов были незначительны по сравнению с контролем (рис. 2).

Основными полосами поглощения для контроля (плёнка на основе желатина, без включения растительного экстракта) являются следующие [17]: широкая полоса

в интервале частот 3300–3500 cm^{-1} (соответствует валентным колебаниям $\text{N}-\text{H}$ -группы), характерные пики поглощения при частотах 1654 cm^{-1} (амид I, соответствует валентным колебаниям групп CO , CN), 1542 cm^{-1} (амид II, соответствует валентным колебаниям $\text{N}-\text{H}$, CN) и 1234 cm^{-1} (амид III, соответствует валентным колебаниям $\text{C}-\text{N}$ и $-\text{NH}$).

Пик, наблюдаемый при 1031 cm^{-1} , связан с образованием водородных связей, возникающими между пластификатором (OH -группа глицерина) и структурой полимера [18, 19].

Термическая стабильность является одной из значимых характеристик плёночных материалов. В данной работе термические свойства плёнок были проанализированы с помощью кри-вых термогравиметрического анализа (рис. 3).

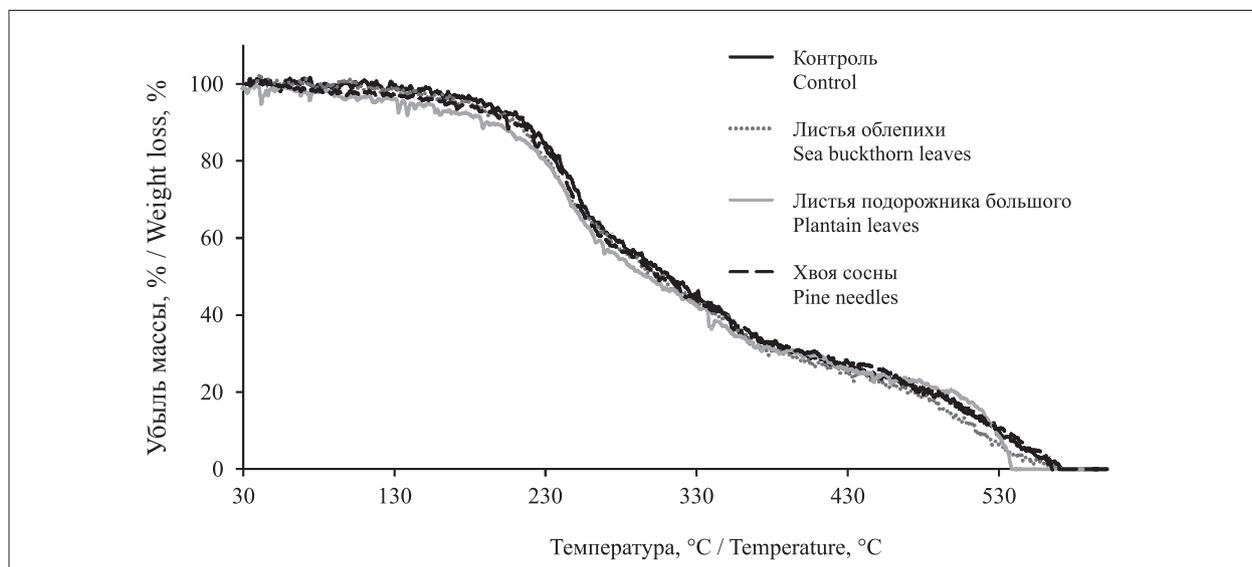


Рис. 3. Термограммы исследуемых плёнок
Fig. 3. Thermograms of investigated films

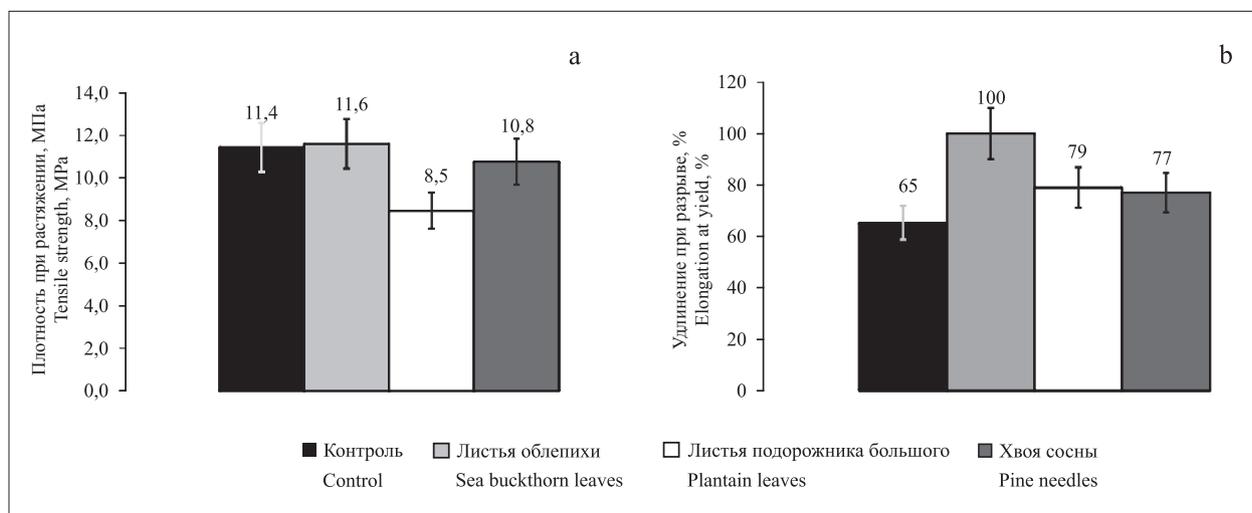


Рис. 4. Физико-механические показатели плёнок: прочность при растяжении (а) и удлинение при разрыве (b)
Fig. 4. Physical and mechanical parameters: tensile strength (a) and elongation at break (b) for the studied films

Для всех исследованных образцов, в том числе контроля, наблюдали три основные стадии потери массы: первая стадия (до 140 °C) связана с испарением влаги из плёнок [20]; вторая стадия (от 140 °C до 270 °C) вызвана потерей глицерина [21]; третья стадия (от 270 °C) обусловлена разложением основного пептида желатиновой матрицы [3].

Эксплуатационные свойства плёнок. Полученные значения физико-механических показателей (прочность при растяжении и удлинение при разрыве) для плёнок представлены на рисунке 4.

Прочностные показатели для контрольной плёнки и плёнок, содержащих растительные

экстракты, сходны с представленными в литературе [21, 22].

Для всех исследованных образцов удлинение при разрыве было больше, чем в контроле. Так, для плёнок, содержащих экстракт листьев облепихи, удлинение при разрыве увеличилось до 100% по сравнению с 65%, отмеченными для контрольного образца. Данный факт может быть связан с наличием флавоноидов, которые играют роль пластификатора: для образцов, приготовленных на основе экстрактов, содержащих большее количество флавоноидов, отмечается большее удлинение при разрыве.

Присутствие пластификаторов одновременно с увеличением эластичности обычно

вызывает снижение прочности, что и наблюдали для образцов плёнок, содержащих экстракт из листьев подорожника и хвои сосны. Для образцов, содержащих экстракт из листьев облепихи, прочность сохранялась на уровне контрольного образца, что возможно связано с более высоким содержанием дубильных веществ, которые могут участвовать в образовании дополнительных связей между макромолекулами желатина, способствуя повышению прочности плёнки.

Исследование способности плёнок к водопоглощению важно с точки зрения характеристики их стабильности. Данная характеристика определяется многими факторами. Один из них – продолжительность контакта плёнки с водой. В ходе исследования водопоглощения плёнок в течение 60 мин отмечали увеличение количества поглощённой воды (рис. 5).

Независимо от варианта опыта водопоглощение образцов достигало 200–250% от их первоначальной массы. Наибольшую степень водопоглощения отмечали в контрольном варианте, наименьшую – у плёнок с включением экстракта из листьев подорожника. В целом тенденция к снижению уровня водопоглощения плёнок, по сравнению контролем, была характерна для всех вариантов плёнок с включением растительных экстрактов. Аналогичный эффект снижения водопоглощения плёнок за счёт добавления растительных экстрактов описан в литературе [23, 24]. Такое явление может быть связано с изменением молекулярной упаковки желатина [25]

и средства к молекулам растворителя за счёт появления веществ, содержащихся в растительных экстрактах, например, гидрофобной природы (витамины, масла и т. п.) [26].

Использование растительных экстрактов в меньшей степени влияло на абсорбционные свойства плёнок (рис. 6).

Использование экстракта из листьев облепихи обеспечивало плёнкам большую паропроницаемость по сравнению с контролем. Так, на протяжении всего периода наблюдений (24–72 ч) паропроницаемость плёнок на основе экстракта из листьев облепихи была выше, чем с экстрактами из листьев подорожника и хвои.

Между величиной паропроницаемости и водопоглощения прослеживали взаимосвязь среднего уровня ($r = 0,63$), если в расчётах учитывать все варианты эксперимента (без учёта контроля), то $r = 0,97$.

Логично предположить, что изменение эксплуатационных свойств плёнок связано с химическим составом используемых растительных экстрактов. Несмотря на многочисленные данные о возможности снижения водопоглощения и паропроницаемости плёнок за счёт добавления танина (дубильные вещества) в их состав, для исследуемых плёнок, напротив, отмечали усиление данных свойств [27]. Отмечали также следующую зависимость: чем больше полифенолов было в экстракте, тем выше показатели паропроницаемости и водопоглощения регистрировали у плёнок на их основе. Между величинами

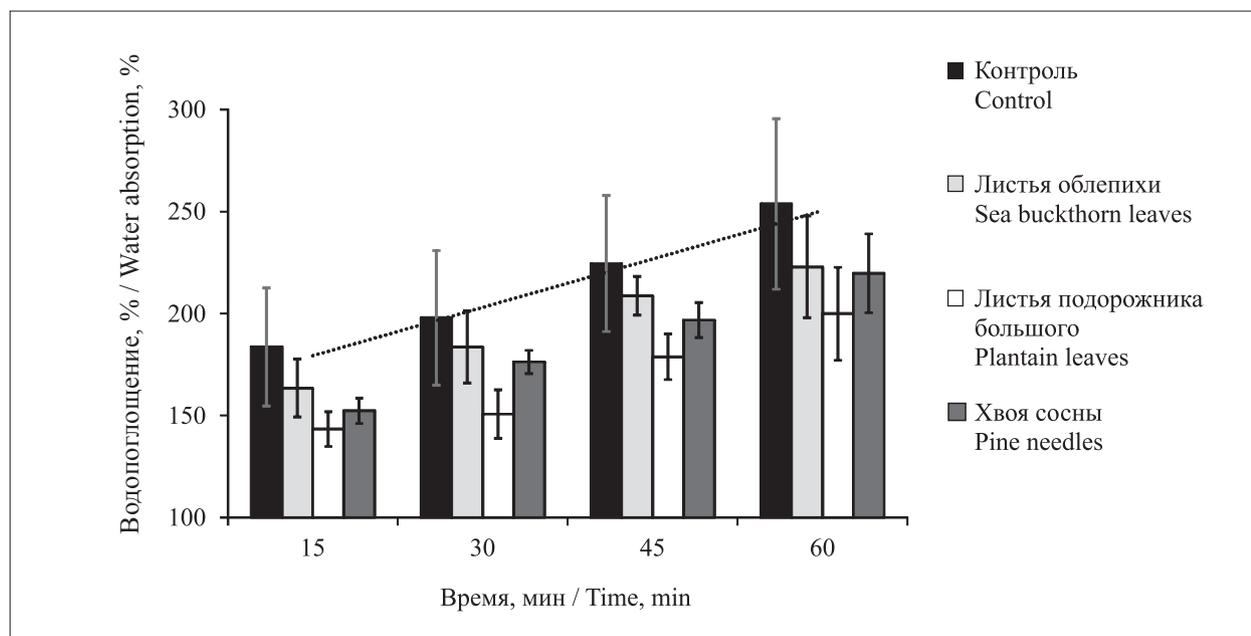


Рис. 5. Динамика водопоглотительной способности плёнок после принудительной сушки
 Fig. 5. Dynamics of water absorption capacity of films after forced drying

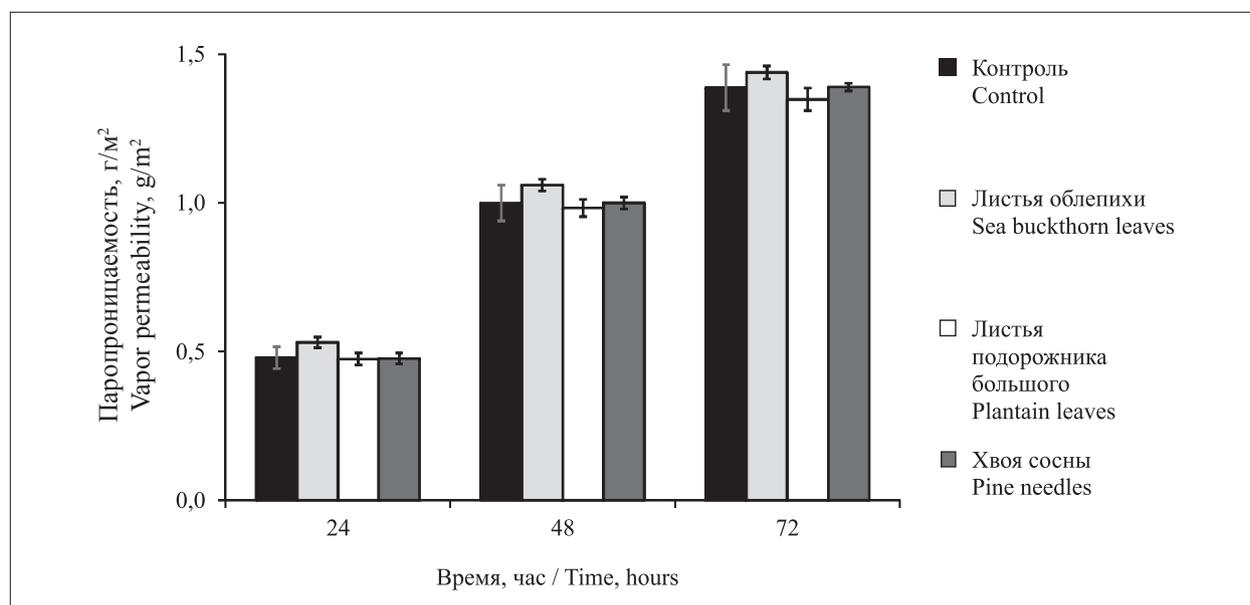


Рис. 6. Динамика паропроницаемости плёнок различного состава
 Fig. 6. Dynamics of vapor permeability of films of various compositions

водопоглощения и количествами полифенолов, дубильных веществ и антиоксидантов отмечали очень тесную положительную взаимосвязь ($r \geq 0,92$ без учёта контроля). Между величинами паропроницаемости и количеством полифенолов, дубильных веществ и антиоксидантов в экстрактах также отмечена тесная корреляционная взаимосвязь ($r = 0,98-0,99$ без учёта контроля). Это может быть связано с тем, что танины, особенно конденсируемый танин, могут ковалентно сшиваться с белковыми молекулами с образованием белково-фенольных полимеров и, таким образом, улучшать некоторые физико-химические свойства плёночных материалов на основе желатина [28].

Заклучение

Проведённые исследования позволяют заключить, что введение в состав плёночных материалов на основе желатина растительных экстрактов, содержащих полифенольные вещества, позволяет регулировать физико-химические свойства получаемых плёнок. Существенные изменения, по сравнению с контролем, отмечены для образцов, содержащих экстракт листьев облепихи: большее удлинение при разрыве при сохранении напряжения при разрыве на уровне контроля, меньшее водопоглощение и большая паропроницаемость в сравнении с контролем. Такое изменение эксплуатационных свойств обусловлено существенно большим

содержанием веществ полифенольной природы: флавоноидов и дубильных веществ, которые выполняют роль пластификаторов и сшивающих агентов. Такое сочетание свойств совместно с высоким содержанием антиоксидантов в составе экстракта из листьев облепихи позволяет определить направления использования рассматриваемых материалов, среди которых можно выделить создание упаковочной плёнки, в том числе обладающей антибактериальной активностью. Учитывая способность желатина к биodeградации [29], можно также ожидать, что получаемые плёнки будут биоразлагаемы.

Литература

1. Riguetto C.V.T., Rosseto M., Alessandretti I., de Oliveira R., Wohlmuth D.A.R., Menezes J.F., Loss R.A., Dettmer A., Pizzutti I.R. Gelatin films from wastes: A review of production, characterization, and application trends in food preservation and agriculture // Food Research International. 2022. V. 162. Part B. Article No. 112114.
2. Riguetto C.V.T., Nazari M.T., Massuda L.Á., Ostwald B.E.P., Piccin J.S., Dettmer A. Production and environmental applications of gelatin-based composite adsorbents for contaminants removal: a review // Environ. Chem. Lett. 2021. V. 19. P. 2465–2486.
3. Li K., Jin Sh., Chen H., Li J. Bioinspired interface engineering of gelatin/cellulose nanofibrils nanocomposites with high mechanical performance and antibacterial properties for active packaging // Composites Part B: Engineering. 2019. V. 171. P. 222–234.

4. Irfan N.I., Zubir A.Z.M., Suwandi A., Haris M.S., Jaswir I., Lestari W. Gelatin-based hemostatic agents for medical and dental application at a glance: A narrative literature review // *The Saudi Dental Journal*. 2022. V. 34. P. 699–707.
5. Rosseto M., Rigueto C.V.T., Krein D.D.C., Massuda L.A., Balb'e N.P., Colla L.M., Dettmer A. Combined effect of transglutaminase and phenolic extract of *Spirulina platensis* in films based on starch and gelatin recovered from chrome III tanned leather waste // *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 2021. V. 15. No. 5. P. 1406–1420.
6. Roy S., Ezati P., Rhim J.-Wh. Fabrication of antioxidant and antimicrobial pullulan/gelatin films integrated with grape seed extract and sulfur nanoparticles // *ACS Appl. Bio Mater*. 2022. V. 5. No. 5. P. 2316–2323.
7. Вэлинг А., де Конэн А.А.П. Способ сшивания биополимеров // Патент RU 2 732 928 С1. Заявка: 2019142085, 14.07.2017. Дата регистрации: 24.09.2020.
8. Немерешина О.Н., Гусев Н.Ф., Малкова Т.Л. Изучение биологически активных веществ и антимикробной активности листьев подорожника ланцетного *Plantago lanceolata* // Башкирский химический журнал. 2014. № 4. Т. 21. С. 133–142.
9. Лебедева Д.Д., Трусов Н.А., Соломонова Е.В., Ноздрин Т.Д., Меер Т.П. Перспективы использования хвойных растений Московского региона в качестве биобезопасного источника аскорбиновой кислоты // *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2018. № 8. С. 31–35.
10. Фокина А.И., Скугорева С.Г., Трефилова Л.В., Даровских Л.В. Определение показателей окислительного стресса в мясе лекарственной при действии микромицета *Fusarium culmorum* и его антагонистов // *Теоретическая и прикладная экология*. 2022. № 2. С. 77–83.
11. Федосеева Л.М., Кутателадзе Г.Р. Изучение некоторых фенольных соединений надземной части щавеля кислого, развивающегося на территории Алтайского края // *Химия растительного сырья*. 2017. № 9. С. 91–96.
12. Максимова Т.В., Никулина И.Н., Пахомов В.П., Шкарина Е.И., Чумакова З.В., Арзамасцев А.П. Способ определения антиокислительной активности // Патент RU 2170930 С1. Заявка: 2000111426/14, 2000.05.05. Дата публикации: 20.07.2001.
13. Шлейкин А.Г., Шаталов И.С., Шаталова А.С. Влияние трансглутаминазы на механические характеристики упаковочного материала на основе желатина // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств»*. 2014. № 2 [Электронный ресурс] <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-transglutaminazy-na-mehaniicheskie-harakteristiki-upakovochного-materiala-na-osnove-zhelatina> (Дата обращения: 26.06.2023).
14. Ковязина Н.А. Изучение физико-химических свойств плёнок лекарственных СЕКСТОФАГ // *Вестник ВГУ. Серия: Химия. Биология. Фармация*. 2022. № 1. С. 78–84.
15. Takó M., Kerekes E.B., Zambrano C., Kotogán A., Papp T., Krisch J., Vágvölgyi C. Plant phenolics and phenolic-enriched extracts as antimicrobial agents against food-contaminating microorganisms // *Antioxidants*. 2020. V. 9. No. 2. Article No. 165.
16. Тринева О.В., Рудая М.А., Гудкова А.А., Сливкин А.И. Применение ИК-спектроскопии в анализе лекарственного растительного сырья // *Вестник ВГУ. Серия: Химия. Биология. Фармация*. 2018. № 4. С. 187–194.
17. Ямпольская Г.П., Тарасевич Б.Н., Еленский А.А. Вторичная структура глобулярных белков в адсорбционных слоях на границе фаз раствор-воздух по данным ИК-спектроскопии с Фурье-преобразованием // *Коллоидный журнал*. 2005. Т. 67. № 3. С. 426–432.
18. Cerqueira M.A., Souza B.W., Teixeira J.A., Vicente A.A. Effect of glycerol and corn oil on physicochemical properties of polysaccharide films: a comparative study // *Food Hydrocolloids*. 2012. V. 27. No. 1. P. 175–184.
19. Shankar S., Teng X., Li G., Rhim J.W. Preparation, characterization, and antimicrobial activity of gelatin/ZnO nanocomposite films // *Food Hydrocolloids*. 2015. V. 45. P. 264–271.
20. Nilsuwan K., Benjakul S., Prodpran T. Properties and antioxidative activity of fish gelatin-based film incorporated with epigallocatechin gallate // *Food Hydrocolloids*. 2018. V. 80. P. 212–221.
21. Luo M., Cao Y., Wang W., Chen X., Cai J., Wang L., Xiao J. Sustained-release antimicrobial gelatin film: effect of chia mucilage on physicochemical and antimicrobial properties // *Food Hydrocolloids*. 2019. V. 87. P. 783–791.
22. Amjadi S., Emaminia S., Heyat Davudian Sh., Pourmohammad S., Hamishehkar H., Roufegarinejad L. Preparation and characterization of gelatin-based nanocomposite containing chitosan nanofiber and ZnO nanoparticles // *Carbohydrate Polymers*. 2019. V. 216. P. 376–384.
23. Xu M., Yu X., Chen X., Yuan G. Physico-chemical, biological properties of films based on chitosan/gelatin with finger bran extract // *Food Measure*. 2022. V. 16. P. 2939–2947.
24. Kavusi G., Dadfar S.M.M., Purfard A.M. Mechanical, physical, antioxidant and antimicrobial properties of thymol-containing gelatin films for potential use as nano-layering for wounds // *Journal of Food Science*. 2013. V. 78. No. 2. P. 244–250.
25. Иржак В.И., Королев Г.В., Соловьев М.Е. Межмолекулярное взаимодействие в полимерах и модель физической сетки // *Успехи химии*. 1997. Т. 66. № 2. С. 179–200.
26. Nastasi J.R., Kontogiorgos V., Daygon V.D., Fitzgerald M.A. Pectin-based films and coatings with plant extracts as natural preservatives: A systematic review // *Trends in Food Science & Technology*. 2022. V. 120. P. 193–211.
27. Wang H., Wang L. Developing a bio-based packaging film from soya by-products incorporated with valonea tannin // *Journal of Cleaner Production*. 2017. V. 143. P. 624–633.

28. Nie X., Zhao L., Wang N., Meng X. Phenolics-protein interaction involved in silver carp myofibrillar protein films with hydrolysable and condensed tannins // *LWT – Food Science and Technology*. 2017. V. 81. P. 258–264.

29. Rudnik E. *Compostable polymer materials*. Second Edition. Elsevier, 2019. 410 p.

References

1. Rigueto C.V.T., Rosseto M., Alessandretti I., de Oliveira R., Wohlmuth D.A.R., Menezes J.F., Loss R.A., Dettmer A., Pizzutti I.R. Gelatin films from wastes: A review of production, characterization, and application trends in food preservation and agriculture // *Food Research International*. 2022. V. 162. Part B. Article No. 112114. doi: 10.1016/j.foodres.2022.112114

2. Rigueto C.V.T., Nazari M.T., Massuda L.Á., Ostwald B.E.P., Piccin J.S., Dettmer A. Production and environmental applications of gelatin-based composite adsorbents for contaminants removal: a review // *Environ. Chem. Lett.* 2021. V. 19. P. 2465–2486. doi: 10.1007/s10311-021-01184-0

3. Li K., Jin Sh., Chen H., Li J. Bioinspired interface engineering of gelatin/cellulose nanofibrils nanocomposites with high mechanical performance and antibacterial properties for active packaging // *Composites Part B: Engineering*. 2019. V. 171. P. 222–234. doi: 10.1016/j.compositesb.2019.04.043

4. Irfan N.I., Zubir A.Z.M., Suwandi A., Haris M.S., Jaswir I., Lestari W. Gelatin-based hemostatic agents for medical and dental application at a glance: A narrative literature review // *The Saudi Dental Journal*. 2022. V. 34. P. 699–707. doi: 10.1016/j.sdentj.2022.11.007

5. Rosseto M., Rigueto C.V.T., Krein D.D.C., Massuda L.A., Balb'e N.P., Colla L.M., Dettmer A. Combined effect of transglutaminase and phenolic extract of *Spirulina platensis* in films based on starch and gelatin recovered from chrome III tanned leather waste // *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 2021. V. 15. No. 5. P. 1406–1420. doi: 10.1002/bbb.2244

6. Roy S., Ezati P., Rhim J.-Wh. Fabrication of antioxidant and antimicrobial pullulan/gelatin films integrated with grape seed extract and sulfur nanoparticles // *ACS Appl. Bio Mater.* 2022. V. 5. No. 5. P. 2316–2323. doi: 10.1021/acsabm.2c00148

7. Wahling A., De Konen A.A.P. Biopolymer cross-linking method // Patent RU 2 732 928 C1. Application: 2019142085, 14.07.2017. Date of publication: 24.09.2020 (in Russian).

8. Nemereshina O.N., Gusev N.F., Malkova T.L. Study of biologically active substances and antimicrobial activity of plantain leaves of lanceolate *Plantago lanceolata* // *Bashkirskiy khimicheskij zhurnal*. 2014. V. 21. No. 4. P. 133–142 (in Russian).

9. Lebedeva D.D., Trusov N.A., Solomonova E.V., Nozdrina T.D., Meer T.P. Prospects of using coniferous

plants of the Moscow Region as a biosafety source of ascorbic acid // *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*. 2018. No. 8. P. 31–35 (in Russian).

10. Fokina A.I., Skugoreva S.G., Trefilova L.V., Davrosvikh L.V. Determination of oxidative stress indicators in *Melissa officinalis* under the action of micromycete *Fusarium culmorum* and its antagonists // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 2. P. 77–83 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-077-083

11. Fedoseeva L.M., Kutateladze G.R. Study of some phenolic compounds of the aboveground part of sour sorrel, developing in the Altai Territory // *Khimiya Rastitel'nogo Syrya*. 2017. No. 9. P. 91–96 (in Russian). doi: 10.14258/jcprm.2017041861

12. Maksimova T.V., Nikulina I.N., Pakhomov V.P., Shkarina E.I., Chumakova Z.V., Arzamastsev A.P. Method for determining antioxidant activity // Patent RU 2170930 C1. Application: 200011126/14. Date of publication: 20.07.2001 (in Russian).

13. Shleykin A.G., Shatalov I.S., Shatalova A.S. The effect of transglutaminase on the mechanical characteristics of packaging material based on gelatin // *Scientific journal NRU ITMO. Series “Processes and apparatuses of food production”*. 2014. No. 2 [Internet resource] <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-transglutaminazy-namehanicheskie-harakteristiki-upakovochnogo-materiala-na-osnove-zhelatina> (Accessed: 26.06.2023) (in Russian).

14. Kovyazina N.A. Study of the physicochemical properties of films of medicinal SEXTOPHAG // *Bulletin of VSU. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy*. 2022. No. 1. P. 78–84 (in Russian).

15. Takó M., Kerekes E.B., Zambrano C., Kotogán A., Papp T., Krisch J., Vágvölgyi C. Plant phenolics and phenolic-enriched extracts as antimicrobial agents against food-contaminating microorganisms // *Antioxidants*. 2020. V. 9. No. 2. Article No. 165. doi: 10.3390/antiox9020165

16. Trineeva O.V., Rudaya M.A., Gudkova A.A., Slivkin A.I. Application of IR spectroscopy in the analysis of medicinal plant materials // *Bulletin of VSU. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy*. 2018. No. 4. P. 187–194 (in Russian).

17. Yampolskaya G.P., Tarasevich B.N., Elenskiy A.A. Secondary structure of globular proteins in adsorption layers at the solution-air phase boundary according to fourier transform IR spectroscopy data // *Colloid Journal*. 2005. V. 67. No. 3. P. 426–432 (in Russian).

18. Cerqueira M.A., Souza B.W., Teixeira J.A., Vicente A.A. Effect of glycerol and corn oil on physicochemical properties of polysaccharide films: a comparative study // *Food Hydrocolloids*. 2012. V. 27. No. 1. P. 175–184.

19. Shankar S., Teng X., Li G., Rhim J.W. Preparation, characterization, and antimicrobial activity of gelatin/ZnO nanocomposite films // *Food Hydrocolloids*. 2015. V. 45. P. 264–271.

20. Nilsuwan K., Benjakul S., Prodpran T. Properties and antioxidative activity of fish gelatin-based film incorporated with epigallocatechin gallate // *Food*

Hydrocolloids. 2018. V. 80. P. 212–221. doi: 10.1016/j.foodhyd.2018.01.033

21. Luo M., Cao Y., Wang W., Chen X., Cai J., Wang L., Xiao J. Sustained-release antimicrobial gelatin film: effect of chia mucilage on physicochemical and antimicrobial properties // *Food Hydrocolloids*. 2019. V. 87. P. 783–791. doi: 10.1016/j.foodhyd.2018.09.010

22. Amjadi S., Emaminia S., Heyat Davudian Sh., Pourmohammad S., Hamishehkar H., Roufegarinejad L. Preparation and characterization of gelatin-based nanocomposite containing chitosan nanofiber and ZnO nanoparticles // *Carbohydrate Polymers*. 2019. V. 216. P. 376–384. doi: 10.1016/j.carbpol.2019.03.062

23. Xu M., Yu X., Chen X., Yuan G. Physico-chemical, biological properties of films based on chitosan/gelatin with finger bran extract // *Food Measure*. 2022. V. 16. P. 2939–2947. doi: 10.1007/s11694-022-01406-1

24. Kavusi G., Dadfar S.M.M., Purfard A.M. Mechanical, physical, antioxidant and antimicrobial properties of thymol-containing gelatin films for potential use as nano-layering for wounds // *Journal of Food Science*. 2013. V. 78. No. 2. P. 244–250.

25. Irzhak V.I., Korolev G.V., Solovov M.E. Intermolecular interaction in polymers and the physical network model // *Uspekhi Khimii*. 1997. V. 66. No. 2. P. 179–200 (in Russian).

26. Nastasi J.R., Kontogiorgos V., Daygon V.D., Fitzgerald M.A. Pectin-based films and coatings with plant extracts as natural preservatives: A systematic review // *Trends in Food Science & Technology*. 2022. V. 120. P. 193–211. doi: 10.1016/j.tifs.2022.01.01

27. Wang H., Wang L. Developing a bio-based packaging film from soya by-products incorporated with valonea tannin // *Journal of Cleaner Production*. 2017. V. 143. P. 624–633.

28. Nie X., Zhao L., Wang N., Meng X. Phenolics-protein interaction involved in silver carp myofibrillar protein films with hydrolysable and condensed tannins // *LWT – Food Science and Technology*. 2017. V. 81. P. 258–264.

29. Rudnik E. *Compostable polymer materials*. Second Edition. Elsevier, 2019. 410 p. doi: 10.1016/C2012-0-07075-5

Направления рационального и комплексного использования минеральных ресурсов недр при открытых горных работах

© 2023. В. С. Коваленко¹, д. т. н., профессор,
В. П. Мешалкин^{2, 3, 4}, академик РАН, зав. кафедрой,
А. В. Колесников³, к. т. н., доцент, с. н. с.,

¹Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
119049, Россия, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4,

²Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет),

190013, Россия, г. Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 26,

³Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева,
125047, Россия, г. Москва, Миусская площадь, д. 9,

⁴Институт общей и неорганической химии имени Н. С. Курнакова РАН,
119991, Россия, г. Москва, Ленинский проспект, д. 31,
e-mail: artkoles@list.ru

В статье излагаются основные направления рационального и комплексного использования минеральных ресурсов недр и пути их реализации при открытом способе разработки месторождений. Выявляются проблемы, которые препятствуют дальнейшей целесообразной переработке отходов. Анализируется достигнутый опыт и перспективы комплексного освоения месторождений руд чёрных и цветных металлов, горно-химического сырья и угля. Рассматривается проблема комплексного использования углей в промышленности с целью извлечения редких элементов (в частности, германия и скандия) из минеральной составляющей. Особое внимание обращается на специфику перехода на малоотходные, ресурсосберегающие технологии горного и обогащательного производства, на их эффективность и экологическую безопасность на многих горных предприятиях. Исследуются направления утилизации отходов горно-обогащательных производств и пути их использования для внутренних нужд предприятия, на примере использования вскрышных пород Лебединского горно-обогащательного комбината. Приводятся рекомендации по вовлечению в разработку техногенных месторождений и некондиционного минерального сырья с использованием физико-химических способов извлечения полезных компонентов. Отмечается, что до настоящего времени не удалось выстроить комплексную систему рационального освоения минерально-сырьевой базы страны, что так необходимо для сохранения невозобновляемых природных ресурсов недр и успешной реализации задач Национального проекта «Экология». Особая роль при этом должна быть отведена научным исследованиям по разработке экоинновационных технологий добычи и переработки полезных ископаемых.

Ключевые слова: рациональное освоение недр, комплексное использование минерального сырья, техногенные месторождения, отходы, физико-химические способы извлечения.

Directions of rational and integrated use of mineral resources of the subsoil in open-pit mining

© 2023. V. S. Kovalenko¹ ORCID: 0000-0001-5675-3288^{*}

V. P. Meshalkin^{2, 3, 4} ORCID: 0000-0001-6956-6705^{*}, A. V. Kolesnikov³ ORCID: 0000-0002-4586-6612^{*}

¹National Research Technological University "MISIS",
4, Leninsky Prospekt, Moscow, Russia, 119049,

²St. Petersburg State Technological Institute (Technical University),
26, Moskovsky Prospekt, St. Petersburg, Russia, 190013,

³D. I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology,
9, Miusskaya Square, Moscow, Russia, 125047,

⁴N. S. Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry
of the Russian Academy of Sciences,
31, Leninsky Prospekt, Moscow, Russia, 119991,
e-mail: artkoles@list.ru

The aim of the work is to study the methods of rational subsurface use in open-pit mining. The article outlines the main directions of rational and integrated use of mineral resources of the subsurface and the ways of their implementation in the open method of field development. The problems that prevent further expedient waste processing are identified. The achieved experience and prospects of complex development of deposits of ferrous and non-ferrous metals, mining and chemical raw materials and coal are analyzed. The problem of complex utilization of coals in industry in order to extract rare elements (in particular germanium and scandium) from the mineral component is considered. Special attention is paid to the specifics of transition to low-waste, resource-saving technologies of mining and enrichment production, to their efficiency and environmental safety at many mining enterprises. The directions of waste disposal of mining and processing industries and ways of their use for the internal needs of the enterprise, namely the use of overburden rocks of the Lebedinsky mining and processing plant, are investigated. Recommendations for the involvement in the development of man-made deposits and substandard mineral raw materials using physico-chemical methods for extracting useful components are given. It is noted that a comprehensive system of rational development of the country's mineral resource base has not been built to date. This system is of great importance for the preservation of non-renewable natural resources of the subsoil and the successful implementation of the tasks of the National Project "Ecology". A special role should be given to scientific research on the development of eco-innovative technologies for mining and processing of minerals.

Keywords: rational development of mineral resources, integrated use of mineral raw materials, man-made deposits, waste, physico-chemical extraction methods.

Из недр ежегодно извлекаются огромные объёмы горных пород, исчисляемые десятками миллиардов тонн. Интенсивная деятельность человека ведёт к истощению содержащихся в недрах запасов полезных ископаемых, к структурному, гидрогеологическому и химическому изменению недр. Эти причины обуславливают необходимость рационального недропользования. Решение этой проблемы в настоящее время сводится к более полному и качественному извлечению из недр полезных ископаемых и комплексному использованию минерального сырья. В этом направлении имеются определённые успехи как практического, так и научного порядка. Вместе с тем по оценке специалистов при современной технологии добычи полезных ископаемых и извлечения полезных компонентов лишь порядка 3–5% от всего объёма извлекаемых из недр горных пород реализуется в виде готовой продукции различных производств, а остальное (95–97%) является отходами [1]. Актуальность этой проблемы возрастает по мере увеличения объёмов добываемых из недр минеральных ресурсов и ухудшения горно-геологических и горнотехнических условий разработки многих месторождений.

Цель работы – поиск методов рационального недропользования при ведении открытых горных работ.

Основные направления рационального недропользования при открытых горных работах

Рациональное и комплексное освоение месторождений полезных ископаемых и добываемого минерального сырья является в современных условиях основой рационального недропользования при открытых горных

работах, на долю которого приходится более 80% от общего объёма добываемых полезных ископаемых.

В настоящее время можно выделить несколько направлений рационального и комплексного освоения месторождений полезных ископаемых и использования минеральных ресурсов недр (рис. 1) [2–7].

Рациональное использование минеральных ресурсов включает:

- полное извлечение и использование полезных компонентов из извлекаемых недр горных пород;

- отдельную выемку и отдельное складирование временно неиспользуемого минерального сырья (не кондиционного и временно не востребованного полезного ископаемого) с целью возможного использования в будущем.

В целях реализации первого направления принимаются следующие технические, технологические и организационные мероприятия:

- снижение потерь и разубоживания добываемых полезных ископаемых;

- стабилизация качества добываемых полезных ископаемых, поступающих потребителям или на пункт переработки или обогащения;

- увеличение комплексности и полноты извлечения полезных компонентов из балансовых и забалансовых запасов и попутно добываемых полезных ископаемых обогатительными и другими средствами переработки;

- переработка пород и заскладированных бедных руд, лежалых хвостов обогащения, формирование и разработка техногенных месторождений и т. д.

После реализации выше отмеченных мероприятий остаются отходы в виде «пустых» горных пород (не содержащих, как считается сегодня, полезных компонентов), неконди-

ционных попутно добываемых полезных ископаемых (содержащих полезные компоненты в недопустимо малом количестве или в низком их качестве) и отходов переработки и обогащения полезных ископаемых, в которых полезные компоненты остались в таких количествах, составе и виде, извлечение которых технологически затруднено и не является пока экономически целесообразным.

Следующее важнейшее направление рационального недропользования заключается в возможно более полном, экономически целесообразном и экологически безопасном использовании отходов для различных целей.

Хорошо известно, что отходы являются одним из ключевых последствий осуществления практически любой хозяйственной деятельности человека. Экологические проблемы создаются как промышленными отходами, так и коммунальными. В 2020 г. на территории Российской Федерации (РФ) образовалось 6959,3 млн т отходов. За период с 2010 по 2020 гг. совокупная масса отходов, образованных в РФ, увеличилась в 1,9 раза [8]. Источником наибольшего объёма отходов в 2020 г. стала добывающая промышленность, на которую приходится 91,5% от общего объёма. Причём доля данной отрасли сохраняет устойчивый рост объёмов образования отходов.

В принципе, можно использовать всё, что мы извлекаем из недр, но, очевидно, не сейчас, а в будущем. Проблема состоит: в отсутствии нужных потребителей на месте; отсутствии или неотработанности, а также дороговизне технологии переработки отходов и, соответственно, в высокой стоимости произведённой вторичной продукции; нехватке средств и нужных специалистов для организации побочного производства; высоких транспортных тарифах и т. п. Всё это приводит к тому, что большую часть отходов приходится складировать, занимая огромные площади. В этой связи в задачи рационального недропользования входит временное размещение отходов в отвалах или в специальных складах, формируя их как техногенные месторождения минерального сырья – продукции, которая найдёт применение в будущем [9].

Опыт комплексного использования минерального сырья

Комплексное использование минеральных ресурсов рассматривается в двух аспектах: использование месторождений полезных ископаемых и комплексное использование добываемого минерального сырья.

Реализация на практике этих направлений позволяет в значительной степени решить проблему рационального использования невозобновляемых минеральных ресурсов недр. Извлечение сопутствующих полезных компонентов из добываемой горной массы позволяет организовать промышленное производство многих необходимых видов продукции. Иногда общая экономическая эффективность извлечения сопутствующих веществ превышает ценность основного полезного ископаемого. Так, например, ценность попутно получаемой продукции медной промышленности составляет 40% [4]. Использование вскрышных пород в некоторых случаях позволяет сократить добычу сырья для производства щебня, извести, стекла, кирпича, керамических изделий, что обеспечивает экономию средств и позволяет сохранить земли, которые были бы нарушены деятельностью специализированных предприятий по добыче минерального сырья для строительных материалов. Это стало уже аксиомой сегодняшнего дня, но ограниченным воплощением на практике.

Известно, что большинство месторождений полезных ископаемых являются комплексными, в которых кроме основных имеется большое число сопутствующих компонентов. Железным рудам сопутствуют: Ti, V, Co, Ni, Cu, Au, Pt, апатит, Ge, P, S, B, Ta, Nb, Zr. В рудах некоторых месторождений железа содержание цветных и редких металлов больше, чем в месторождениях для добычи собственно этих металлов. Медным рудам сопутствуют: Zn, Mo, Pb, Fe, S, Au, Ag, Cd, Os, Se, Te, Bi, Ge; никелевым: Cu, S, Co, Au, Ag, Ge, Y, Se, Te; свинцово-цинковым: Cu, Sn, Bi, Ba, Au, Ag, S, Cd, In, Se, Te, Ta, Ge; вольфрамомолибденовым: Cu, Bi, S, Sn, Au; флюоритовым: Pb, Ba, Zn, Ag, Au, Re, Sc, Be, Se, Te, Ge; оловянным: Cu, Pb, Zn, W, Bi, S, Ag, In, Cd, Ge.

В горнодобывающей промышленности имеется немало примеров комплексного использования месторождений руд чёрных и цветных металлов, но в целом эта проблема решается медленно. Так, в цветной металлургии попутно с 12 профилирующими металлами (Al, Cu, Ni, Co, Pb, Zn, W, Mo, Au, Hg, Sn, Sb) из руд можно извлекать ещё порядка 60–65 полезных компонентов, в том числе благородные металлы, редкоземельные элементы. Уже сегодня из руд цветных металлов на обогатительных фабриках получают до 3–4 видов концентратов, а на металлургических заводах попутно извлекают многие полезные компоненты руд цветных и редких металлов.

Однако степень их извлечения недостаточна, более половины полезных компонентов не извлекаются вообще из-за отсутствия технологических извлечений, дороговизны или ограниченного спроса на местах добычи и переработки минеральных ресурсов.

Объектом комплексного использования должны являться также апатито-нефелиновые руды месторождений фосфатного сырья в Хибинах, в которых представлена чуть ли не половина элементов периодической системы [4, 10]. Основной минерал разрабатываемых месторождений – апатит, относительное количество которого в рудах колеблется в пределах от 16–20% в бедных типах руд до 70–75% – в наиболее богатых. Ценность его обусловлена наличием фосфора (17%), редкоземельных металлов и фтора. Относительное количество нефелина в рудах составляет 16–70%. Основной полезный компонент в нём – глинозём (около 32%). Практический интерес представляют оксиды натрия и калия, а также галлий, рубидий и цезий.

Основная ценность титанита – присутствие в нём титана (содержание диоксида титана достигает 41%), имеются небольшие

включения ниобия и тантала. В титаномагнетитах главные полезные компоненты – ванадий и железо, диоксид титана с содержанием от 13 до 20%. Что касается эгирина и полевых шпатов, то они до недавнего времени промышленного интереса не представляли, хотя также содержат ряд полезных компонентов.

В Кольском филиале РАН получены результаты, позволяющие приблизиться к почти безотходной переработке апатито-нефелиновых руд. Если при полном извлечении апатита и частично нефелина коэффициент использования руд не превышает 65%, то при переработке всего нефелина он повышается до 82% [4].

Таким образом, апатито-нефелиновые руды являются потенциальным сырьевым источником для многих отраслей народного хозяйства (рис. 1).

Следует при этом отметить, что в настоящее время разработаны ещё не все эффективные технологии извлечения всех перечисленных полезных компонентов из апатито-нефелиновых руд, но за ними будущее.

Что касается каменных и бурых углей, то, как показывают исследования и опыт наи-

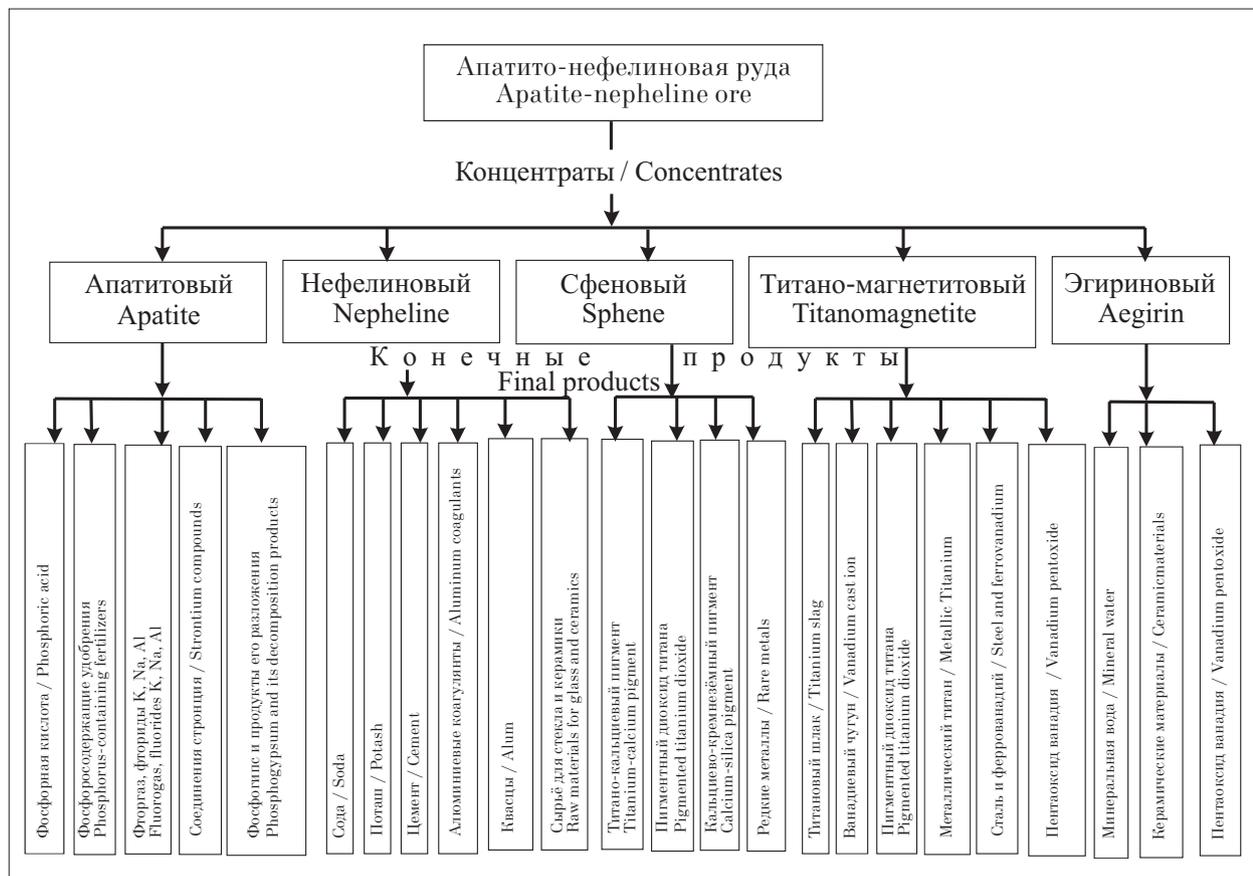


Рис. 1. Направления комплексной переработки апатито-нефелиновой руды
Fig. 1. Directions of complex processing of apatite-nepheline ore

более развитых угледобывающих стран, на современном этапе развития должно быть не просто наращивание объемов угледобычи, но и глубокая переработка углей с получением большого ассортимента угольной продукции с новыми потребительскими свойствами [11–18].

В настоящее время в РФ основной объем угля используется в энергетике и коксовании, частично – для газификации и полукоксования, получения обогащенного топлива для бытовых нужд (газ, жидкие продукты, брикеты), в кирпичном и цементном производстве. В ограниченных объемах уголь используется для производства углеродных коагулянтов и адсорбентов, углеграфитовых изделий, углещелочных реагентов, карбидов кремния и кальция, термоантрацита и термографита, горного воска. Более 80% каменноугольного кокса идет для выплавки чугуна, другие продукты коксования используются в химической промышленности, цветной металлургии, строительной индустрии, железнодорожном транспорте, дорожном строительстве [19].

Одной из актуальных проблем комплексного использования углей является промышленное извлечение редких элементов из минеральной составляющей. По результатам геологических исследований установлено, что наиболее контрастные аномалии в углях месторождений Сибири образуют Se, As, Sr, Mo, Be, Co, Au, Sb, U, Ge, Nb, Y, Zr, Hf, Hg, Cd.

Наиболее привлекательными для первоочередного освоения на сибирских месторождениях угля являются германий и скандий. Запасы последнего могут обеспечить современное мировое потребление этого металла в течение нескольких десятилетий.

Другая перспективная область применения углей – это электрофлотационная технология извлечения растворимых органических компонентов, где активированные угли используются в качестве коагулянтов и сорбентов [16–18, 20, 21].

Установлено, что от одного продукта в угольной отрасли можно произвести более 130 видов химических полупродуктов и более 5000 видов продукции смежных отраслей [11].

Ожидается, что применение новейших технологий извлечения полезных компонентов позволит в обозримой перспективе ускорить решение проблемы комплексного использования не только угля, но и других полезных ископаемых и продуктов их пере-

работки. Это чрезвычайно важно также и с позиций экологической безопасности горно-перерабатывающих производств.

Опыт утилизации вскрышных пород и отходов обогащения

Общее количество утилизированных и обезвреженных отходов в РФ в 2020 г. составило 3429 млн т или 48,9% от общей массы образованных отходов. Для сравнения, в 2016 г. этот показатель достигал 61%. Наибольшую долю по видам экономической деятельности составили утилизация и обезвреживание отходов, образуемых при добыче угля. Их объем в 2020 г. составил 2971 млн т или 46,7% от общей массы образованных отходов в добывающих отраслях [8].

Распределение объема отходов, образовавшихся в РФ, по федеральным округам неравномерное. На восточные регионы приходилось порядка 50% от всего объема отходов, представленных в основном вскрышными породами и отходами обогащения полезных ископаемых. Поэтому в сложившейся ситуации отходы горно-обогатительных производств должны максимально подлежать комплексному использованию и утилизации. Наиболее распространенные направления утилизации отходов горно-обогатительных производств:

- использование отходов для внутренних нужд предприятий;
- производство строительных материалов и промышленных изделий с реализацией продукции внешним потребителям;
- использование в сельском хозяйстве (производство раскислителей почвы, удобрений, использование отходов для улучшения структуры почв и т. д.);
- использование в качестве земляных масс (для восстановления техногенных ландшафтов, строительства площадок для промышленных и гражданских объектов и ограждающих дамб, засыпки выработанного пространства карьеров и шахтных провалов и т.д.);
- использование в качестве закладочного материала при подземной и повторной открытой разработках.

В первую очередь отходы стараются использовать на самом предприятии для собственных нужд. Область их применения в основном касается основных и вспомогательных технологических процессов, обустройства горного и обогатительного производства, строительных работ и рекультивации нарушенных земель (рис. 2).

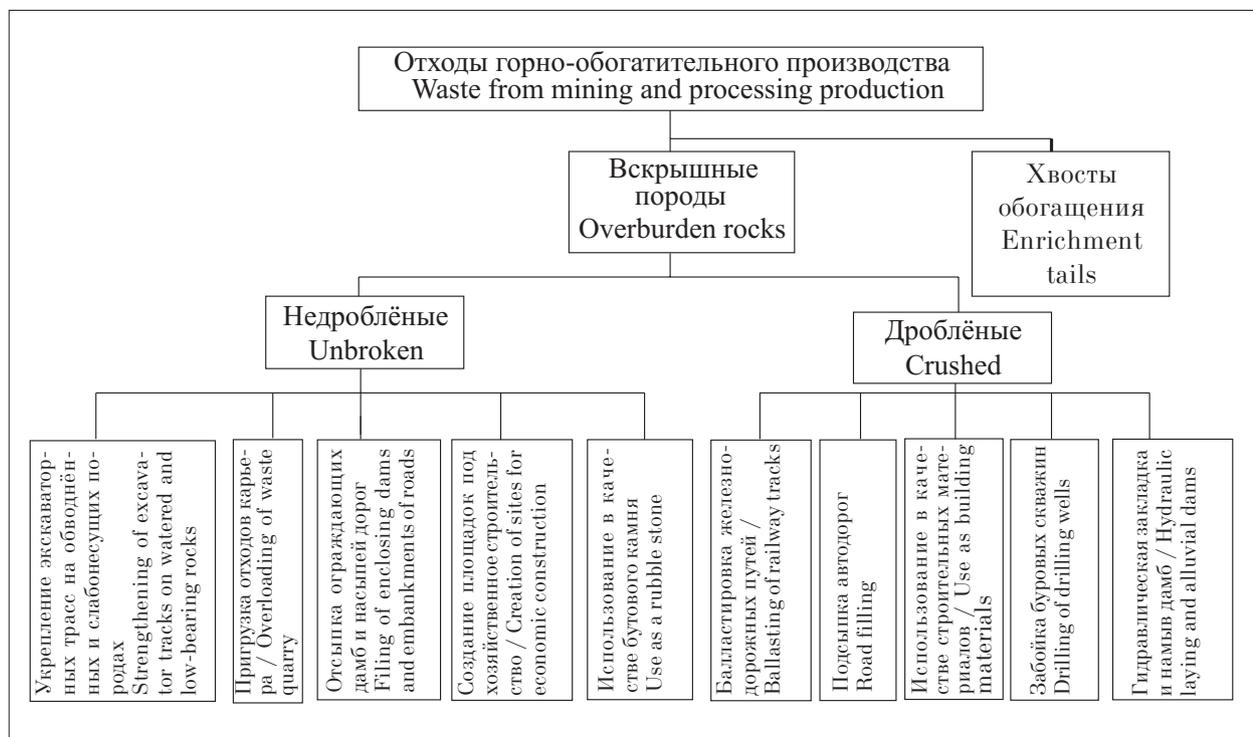


Рис. 2. Пути использования отходов горно-обогатительного производства для внутренних нужд предприятия
Fig. 2. Ways of using waste mining and processing production for the internal needs of the enterprise

Таблица / Table

Направления использования вскрышных пород Лебединского горно-обогатительного комбината
Directions of use of overburden rocks of Lebedinsky mining and processing enterprise

Вскрышные породы Overburden rocks	Использование вскрышных пород Use of overburden rocks
Кристаллические сланцы, амфиболиты Crystal shales, amphibolites	Щебень марки 800–1200 для автомобильных дорог, асфальтобетон, каменное литье, керамические изделия Crushed stone of the 800–1200 brand for highways, asphalt concrete, stone casting, ceramic products
Кварцито-песчаники, кварцевые порфиры Quartzite-sandstones, quartz porphyry	Щебень марок 1000–1200 для тяжёлых бетонов Crushed stone grades 1000–1200 for heavy concrete
Четвертичные глины Quaternary clays	Кирпич, керамзит, черепица, минеральная вата, добавки при производстве цемента Bricks, expanded clay, tiles, mineral wool, additives in the production of cement
Мел Chalk	Известь, цемент, мел молотый, мел для подкормки скота и птицы, гранулированные удобрения, известковая мука, в производстве стекла, керамических изделий и красок Lime, cement, ground chalk, chalk for feeding livestock and poultry, granular fertilizers, lime flour, in the production of glass, ceramic products and paints
Пески Sands	Силикатный кирпич, стеновые блоки, ячеистый бетон, стекло, строительные пески. После обогащения как формовочные и строительные добавки при производстве керамических изделий и кирпича Silicate bricks, wall blocks, cellular concrete, glass, building sands. After enrichment as molding and building additives in the production of ceramic products and bricks

Кроме того, из вскрышных пород и продуктов переработки полезных ископаемых возможно производство многообразных строительных материалов для внешнего потребителя. Безусловно, к ним предъявляются более повышенные (нормативные) требования, что с успехом выдерживается на многих отечественных карьерах. В качестве примера можно привести железорудные предприятия Курской магнитной аномалии (КМА, например, Лебединского горно-обогатительного комбината). Все извлекаемые из недр горные породы данного месторождения уже давно рассматриваются специалистами в качестве потенциального сырья для различных отраслей промышленности, а также в качестве минеральных добавок в сельскохозяйственном производстве (табл.).

В настоящее время вскрышные породы используются в качестве сырья для производства щебня, силикатных стеновых изделий, силикатного кирпича, формовочных песков и строительного песка.

На базе железорудных карьеров КМА построены цементный и известковый заводы, заводы по производству щебня (5 млн м³), силикатного кирпича (100 млн шт. в год), керамзитового гравия, минеральных пигментов и других материалов. Горнорудные предприятия КМА отгружают цементным, известковым заводам и другим организациям ежегодно свыше 5,5 млн м³ мела, около 1,5 млн м³ песка, около 1 млн м³ щебня и свыше 100 тыс. м³ высокоглинозёмной элювиальной глины. Однако использование попутно добываемых пород в народном хозяйстве составляет по разным данным от 3 до 10%. Многочисленными исследованиями подтверждены возможность и экономическая целесообразность создания новых мощностей с доведением коэффициента использования вскрышных пород и отходов обогащения до 15% от общего объёма их образования [4].

В угольной промышленности углесодержащие (15–20%) отходы являются эффективным сырьём для различных отраслей промышленности. Они позволяют резко сократить расход топлива и традиционного сырья при производстве строительных материалов, глинозёма, сернокислого алюминия, кремнеалюминиевых сплавов, карбидкремниевых и других огнеупорных и кислотостойких материалов. Наибольшее количество отходов углеобогащения (около 20–25 млн м³ в год) может быть применено для производства аглопирита (пористого заполнителя лёгких бетонов) и строительной керамики.

Часто на карьерах отходы, особенно вскрышные породы, представлены смесью литологических разновидностей, что усложняет и удорожает производство строительных материалов. Поэтому наиболее целесообразно использовать такие отходы в качестве земляных масс, в том числе для выравнивания рельефа местности, рекультивации нарушенных земель, для замены земляного грунта при строительстве ограждающих дамб, транспортных коммуникаций и других инженерных сооружений.

В настоящее время в нашей стране свыше 50% вскрышных пород, попутно вовлекаемых в разработку, направляются для засыпки собственного выработанного пространства, соседних отработанных карьеров и шахтных провалов. Аналогичный опыт используется в Китае для устранения просадки дневной поверхности в результате подземной угледобычи [14].

Интересен мировой опыт утилизации отходов в гористой местности. Известно, что дефицит горизонтальных площадей в такой местности является фактором, сдерживающим её хозяйственное развитие. Большой опыт по созданию горизонтальных площадей в процессе отработки нагорных месторождений имеется на карьерах Аппалачского угольного бассейна (США) с запасами угля 1600 млрд т до глубины 900 м [15]. Месторождения здесь представлены свитой горизонтальных и пологих угольных пластов, залегающих в гребнях невысоких гор.

Пласты, как правило, выходят на поверхность по обе стороны склона горы. Большая часть вскрышной породы вывозится автотранспортом во внешний отвал в близлежащую долину. В итоге разработки создаётся крупноплощадная поверхность на месте карьерных выемок и внешнего отвала. После рекультивации данная поверхность стала пригодна для многоцелевого использования. Здесь возводят многоквартирные дома, коттеджи, торговые центры, зрелищные объекты, даже аэродромы для местных линий. Более высокая ценность в новых горизонтальных площадях с лихвой оправдала затраты на их создание [10]. Имеются аналогичные примеры при открытой разработке нагорных месторождений Северного Кавказа.

Вовлечение в разработку некондиционного сырья и техногенных месторождений

Один из путей повышения эффективности освоения минеральных ресурсов недр – во-

влечение в открытую разработку некондиционных (забалансовых) запасов многих полезных ископаемых, использование которых в соответствии с утверждёнными кондициями в настоящее время экономически нецелесообразно или технически и технологически невозможно. В процессе технического прогресса или роста цен на минеральное сырьё они могут быть переведены в балансовые.

Забалансовые запасы руды можно рассматривать как важный резерв расширения сырьевой базы, продления срока эксплуатации предприятий, получения дополнительного количества металлов и, соответственно, прибыли, сокращения потерь ценных компонентов и уменьшения отходов производства.

Общие запасы металлов в забалансовых запасах руд эксплуатируемых жильных месторождений соизмеримы с запасами их в балансовых рудах. Примерно такая же ситуация характерна для многих других месторождений [22].

Забалансовые руды могут разрабатываться нетрадиционными способами. Так, в 1970-х гг. впервые в бывшем СССР были осуществлены проекты промышленной разработки забалансовых и бедных по содержанию урана руд способом подземного выщелачивания. Многолетний опыт показал, что технология подземного выщелачивания обеспечивает достаточно эффективное и комплексное использование недр, наиболее высокое по сравнению с традиционными способами извлечение основных и сопутствующих компонентов руд при снижении отходов производства и отрицательного воздействия на окружающую среду.

Данные преимущества позволили существенно нарастить объёмы добычи урана до 40–50% от общего количества урана. Кроме того, была подтверждена возможность извлечения из растворов попутных полезных компонентов: рения, молибдена, ванадия, селена, скандия, иттрия, лантаноидов и др. [23].

Следует отметить, что во многих странах мира уже давно наметился тренд на вовлечение в разработку техногенных месторождений, т. е. ранее заскладированных отвалов и хвостов обогащения, в которых содержание полезных компонентов может на порядок быть выше, чем в действующем карьере. Так, большая доля мировых запасов золота сосредоточена в техногенных месторождениях. В России ресурсный потенциал техногенных золотосодержащих объектов оценивается в 55–60% объёмов добытого в стране золота [24]. Золото здесь часто представлено микродисперсными частицами, что затрудняет его обогащение тра-

диционными (гравитационными) способами. Поэтому часто для их извлечения переходят на физико-химические способы, например, широко используют кучное выщелачивание забалансовых руд, переводя их тем самым в балансовые запасы.

Подводя итог, можно сказать, что в ближайшей перспективе потребности всех отраслей народного хозяйства теоретически могут быть перекрыты за счёт переработки и комплексного использования отходов горного и обогатительного производства, вовлечения в разработку техногенных месторождений и перевода забалансовых запасов в балансовые в результате перехода на новые способы извлечения полезных компонентов. Однако не во всех случаях естественное сырьё может быть заменено техногенным или некондиционным из экономических соображений. Неизбежно часть техногенных ресурсов придётся складировать и создавать тем самым техногенные месторождения. При этом необходимо выполнять требования их защиты от влияния атмосферы, а также предусмотреть возможность последующей более эффективной их разработки при сохранении качественных характеристик минерального сырья.

Заключение

Проблемы рационального и комплексного использования минеральных ресурсов недр при открытой добыче полезных ископаемых остаются актуальными для большинства месторождений РФ.

Специалистами прогнозируется дальнейшее увеличение техногенной нагрузки на геологическую среду и ухудшение экологической ситуации в ряде горнодобывающих регионов страны из-за весьма низкого извлечения полезных компонентов из минерального сырья и образования отходов горно-обогатительного производства в огромных (многомиллиардных) объёмах. В этих условиях повышается роль перехода на малоотходные, ресурсосберегающие технологии горного и обогатительного производства, эффективность и экологическая безопасность которых подтверждена на многих горных предприятиях. При этом следует признать, что пока не удалось выстроить комплексную систему рационального освоения минерально-сырьевой базы страны, что так необходимо для сохранения не возобновляемых природных ресурсов недр и успешной реализации задач Национального проекта «Экология».

Особая роль при этом должна быть отведена научным исследованиям по разработке экоинновационных технологий добычи и переработки полезных ископаемых.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-79-30029).

Литература

1. Управление отходами в современной России / Под ред. А.В. Шевчука. М.: Белый ветер, 2021. 560 с.
2. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В., Юн А.Б., Терентьева Н.В. Становление нового технологического уклада комплексного освоения недр при истощении балансовых запасов месторождений // Горный журнал. 2019. № 4. С. 11–14.
3. Коваленко В.С. Повышение эффективности использования природных и техногенных ресурсов при открытой угледобыче в рамках концепции «зелёной» горнодобывающей промышленности // Уголь. 2018. № 4. С. 60–64.
4. Томаков П.И., Коваленко В.С., Михайлов А.М., Калашников А.Т. Экология и охрана природы при открытых горных работах. М.: МГГУ, 1994. 418 с.
5. Pimentel B.S., Gonzalez E.S., Barboza G.N.O. Decision-support models for sustainable mining networks: fundamentals and challenges // Journal of Cleaner Production. 2016. V. 112. P. 2145–2157.
6. Михайлов В.Г., Галанина Т.В., Михайлова Я.С. Исследование динамики образования и использования отходов углеперерабатывающего предприятия // Горный журнал. 2019. № 4. С. 89–92.
7. Буторина И.В., Буторина М.В. Обзор технологии утилизации отходов горно-металлургической отрасли // Чёрные металлы. 2018. № 12. С. 44–49.
8. О состоянии и охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году. Государственный доклад. М.: Минприроды России; МГУ им. М.В. Ломоносова, 2021. 1000 с.
9. Мохнаткин Г.В., Ашихмина Т.Я., Огородникова С.Ю. Биологический мониторинг природно-техногенных систем // Теоретическая и прикладная экология. 2011. № 4. С. 120–121.
10. Ильин С.А., Коваленко В.С., Манкевич В.В. Ресурсосбережение при открытых горных работах. М.: МГГУ, 1995. 149 с.
11. Ческидов В.Н., Зайцев Г.Д. Проблемы переработки и комплексного использования углей месторождений Сибири // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 6. С. 142–150.
12. Минибаев Р.Р., Корчагина Т.В., Новикова Я.А. К вопросу переработки отходов горного производства предприятиями Кузбасса // Уголь. 2016. № 8. С. 121–123.
13. Коваленко В.С., Артемьев В.Б., Опанасенко П.И. Землесберегающие и землевоспроизводящие технологии на угольных разрезах. М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2013. 440 с.
14. Bing-yuan H., Li-xun K. Mine land reclamation and eco-reconstruction in Shanxi province I: mine land reclamation model // Scientific World Journal. 2014. V. 2014. No. 1. Article No. 483862.
15. Li J., Zipper C.E., Donovan P.F., Wynne R.H., Oliphant A.J. Reconstructing disturbance history for an intensively mined region by time-series analysis of Landsat imagery // Environmental Monitoring and Assessment. 2015. V. IX. Article No. 557.
16. Xia K., Chen C., Deng Y., Xiao G., Zheng Y., Liu X., Fu H., Song X., Chen L. *In situ* monitoring and analysis of the mining-induced deep ground movement in a metal mine // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018. V. 109. P. 32–51.
17. Gaydukova A., Kolesnikov V., Stoyanova A., Kolesnikov A. Separation of highly dispersed carbon material of OU-B grade from aqueous solutions using electroflotation technique // Separation and Purification Technology. 2020. V. 245. Article No. 116861.
18. Колесников А.В., Мешалкин В.П., Давыдова Т.В., Колесников В.А. Научно-технологические основы повышения ресурсоэффективности электрофлотационных процессов извлечения труднорастворимых неорганических соединений (оксиды, карбиды, гидроксиды) из водных растворов электролитов // Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах. 2020. Т. 494. С. 45–51.
19. Cheskidov V.I., Norri V.K., Zaitsev G.D., Botvinnik A.A., Bobyl'sky A.S., Reznik A.V. Effectivization of open pit hard mineral mining // Journal of Mining Science. 2014. V. 50. No. 5. P. 892–903.
20. Kolesnikov A.V., Htay T.Z., Kolesnikov V.A., Kovalenko V.S. Extraction by electroflotation of iron, chromium and aluminium hydroxides from aqueous solutions of sodium chlorides and sulphates in the presence of Mg²⁺, Ca²⁺ and surfactants of different types // CIS Iron and Steel Review. 2020. V. 20. P. 61–65.
21. Мухин В.М., Королёв Н.В. Активные угли как важный фактор устойчивого развития экономики и качества жизни населения // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 4. С. 210–217.
22. Трубецкой К.Н., Галченко Ю.П. Геоэкология освоения недр и экотехнология разработки месторождений. М.: Научтехлитиздат, 2015. 360 с.
23. Культин Ю.В., Камнев Е.Н., Рыбальченко А.И. Основные результаты деятельности АО «ВНИПИПромтехнологии» в области добычи урана методом подземного выщелачивания // Горный журнал. 2021. № 3. С. 26–29.
24. Амдур А.М., Федоров С.А., Апакашев Р.А., Юрак В.В. Экологически безопасная утилизация золотосодержащих силикатно-карбонатных хвостов обогащения // Горный журнал. 2020. № 12. С. 53–55.

References

1. Waste management in modern Russia / Ed. A.V. Shevchuk. Moskva: Belyy veter, 2021. 560 p. (in Russian).
2. Kaplunov D.R., Ryl'nikova M.V., Yun A.B., Terent'eva N.V. Formation of a new technological way of complex development of subsurface resources with depletion of balance reserves of deposits // *Gornyi zhurnal*. 2019. No. 4. P. 11–14 (in Russian). doi: 10.17580/gzh.2019.04.02
3. Kovalenko V.S. Increase in efficiency of natural and man-made resources use in open coal mining within the framework of the concept of “green” mining industry // *Ugol' (Russian coal journal)*. 2018. No. 4. P. 60–64 (in Russian). doi: 10.18796/0041-5790-2018-4-60-63
4. Tomakov P.I., Kovalenko V.S., Mihajlov A.M., Kalashnikov A.T. Ecology and nature protection in open-pit mining. Moskva: MGGU, 1994. 418 p. (in Russian).
5. Pimentel B.S., Gonzalez E.S., Barboza G.N.O. Decision-support models for sustainable mining networks: fundamentals and challenges // *Journal of Cleaner Production*. 2016. V. 112. P. 2145–2157. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.09.023
6. Mihajlov V.G., Galanina T.V., Mihajlova Ya.S. Waste formation and management dynamics in coal mining // *Gornyi zhurnal*. 2019. No. 4. P. 89–92 (in Russian). doi: 10.17580/gzh.2019.04.20
7. Butorina I.V., Butorina M.V. Review of wastes utilization technologies in mining and metallurgical industry // *Chernye Metally*. 2018. No. 12. P. 44–49 (in Russian).
8. On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2020. State report. Moskva: Minprirody Rossii; MGU im. M.V. Lomonosova, 2021. 1000 p. (in Russian).
9. Mokhnatkin G.V., Ashikhmina T.Ya., Ogorodnikova S.Yu. Biological monitoring of natural and man-made systems // *Theoretical and Applied Ecology*. 2011. No. 4. P. 120–121 (in Russian).
10. Il'in S.A., Kovalenko V.S., Mankevich V.V. Resource conservation in open-pit mining. Moskva: MGGU, 1995. 149 p. (in Russian).
11. Cheskidov V.N., Zaycev G.D. Problems of conversion and multipurpose utilization of siberian coal // *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2013. No. 6. P. 142–150 (in Russian).
12. Minibaev R.R., Korchagina T.V., Novikova Ya.A. On mining wastes recycling by kuzbass enterprises // *Ugol' (Russian coal journal)*. 2016. No. 8. P. 121–123 (in Russian). doi: 10.18796/0041-5790-2016-8-121-123
13. Kovalenko V.S., Artem'ev V.B., Opanasenko P.I. Earth-saving and earth-reproducing technologies at coal mines. Moskva: Gornoe delo. OOO “Kimmeriyskiy tsentr”, 2013. 440 p. (in Russian).
14. Bing-yuan H., Li-xun K. Mine land reclamation and eco-reconstruction in Shanxi province I: mine land reclamation model // *Scientific World Journal*. 2014. V. 2014. No. 1. Article No. 483862. doi: 10.1155/2014/483862
15. Li J., Zipper C.E., Donovan P.F., Wynne R.H., Oliphant A.J. Reconstructing disturbance history for an intensively mined region by time-series analysis of Landsat imagery // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2015. V. IX. Article No. 557. doi: 10.1007/s10664-015-4766-1
16. Xia K., Chen C., Deng Y., Xiao G., Zheng Y., Liu X., Fu H., Song X., Chen L. *In situ* monitoring and analysis of the mining-induced deep ground movement in a metal mine // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018. V. 109. P. 32–51. doi: 10.1016/J.IJRMMS.2018.06.014
17. Gaydukova A., Kolesnikov V., Stoyanova A., Kolesnikov A. Separation of highly dispersed carbon material of OU-B grade from aqueous solutions using electroflotation technique // *Separation and Purification Technology*. 2020. V. 245. Article No. 116861. doi: 10.1016/j.seppur.2020.116861
18. Kolesnikov A.V., Meshalkin V.P., Davydkova T.V., Kolesnikov V.A. Scientific and technological foundations of improvement of the resource efficiency of electroflotation recovery of poorly soluble inorganic compounds (oxides, carbides, hydroxides) from aqueous electrolyte solutions // *Doklady Rossiyskoy akademii nauk. Himiya, nauki o materialah*. 2020. V. 494. P. 55–61 (in Russian). doi: 10.31857/S2686953520050076
19. Cheskidov V.I., Norri V.K., Zaitsev G.D., Botvinnik A.A., Bobyl'sky A.S., Reznik A.V. Effectivization of open pit hard mineral mining // *Journal of Mining Science*. 2014. V. 50. No. 5. P. 892–903. doi: 10.1134/S1062739114050081
20. Kolesnikov A.V., Htay T.Z., Kolesnikov V.A., Kovalenko V.S. Extraction by electroflotation of iron, chromium and aluminium hydroxides from aqueous solutions of sodium chlorides and sulphates in the presence of Mg²⁺, Ca²⁺ and surfactants of different types // *CIS Iron and Steel Review*. 2020. V. 20. P. 61–65. doi: 10.17580/cisisr.2020.02.13
21. Mukhin V.M., Korolev N.V. Active carbons as an important factor in the sustainable development of the economy and the quality of life of the population // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 4. P. 210–217 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-4-210-217
22. Trubetskoy K.N., Galchenko Yu.P. Geocology of subsurface development and ecotechnology of field development. Moskva: Nauchtekhlitizdat, 2015. 360 p. (in Russian).
23. Kul'tin Yu.V., Kamnev E.N., Rybal'chenko A.I. VNIPIpromtekhnologi's performance in in-situ uranium leaching // *Gornyi zhurnal*. 2021. No. 3. P. 26–29 (in Russian).
24. Amdur A.M., Fedorov S.A., Apakashev R.A., Yurak V.V. Environmentally benign recycling of gold-bearing silicate-carbonate mill tailings // *Gornyi zhurnal*. 2020. No. 12. P. 53–55 (in Russian). doi: 10.17580/gzh.2020.12.11

Ассоциации миксомицетов в лесных биоценозах (на примере заповедника «Нургуш»)

© 2023. А. А. Широких^{1,2}, д. б. н., в. н. с., профессор,
И. Г. Широких^{1,2}, д. б. н., г. н. с., профессор,
¹Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока
имени Н. В. Рудницкого,
610007, Россия, г. Киров, ул. Ленина, д. 166а,
²Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
e-mail: aleshirokikh@yandex.ru

Сообщества миксомицетов являются неотъемлемым компонентом лесных биоценозов. На примере двух участков заповедника «Нургуш» впервые проведено сравнительное изучение состава и биоразнообразия миксомицетных комплексов. Установлено, что видовое разнообразие миксомицетов выше на участке «Нургуш», а межвидовые ассоциации этих организмов более разнообразны на участке «Тулашор». Важным компонентом, входящим в состав сообществ миксомицетов, являются низшие и высшие грибы. Микромицеты выступают как паразиты, а высшие грибы – как организмы, помогающие миксомицетам осваивать новые субстраты, в частности, разлагающуюся древесину. Неотъемлемым компонентом сообществ являются бактерии, которые для миксомицетов представляют собой не только трофический ресурс, но и способствуют их адаптации к окружающей среде. Среди бактерий, доминирующих в составе миксомицетных сообществ, выявляются виды, синтезирующие индол-3-уксусную кислоту – фитогормон ауксиновой природы, в связи с чем спорофоры миксомицетов могут являться потенциальными источниками биотехнологически ценных штаммов прокариот.

Ключевые слова: миксомицеты, таксоны, субстратный комплекс, бактерии, микромицеты, высшие грибы.

Associations of myxomycetes in forest biocenoses (on the example of the Nurgush Nature Reserve)

© 2023. A. A. Shirokikh^{1,2} ORCID: 0000-0002-7808-0376
I. G. Shirokikh^{1,2} ORCID: 0000-0002-3319-2729

¹Federal Agrarian Scientific Center of the North-East named N. V. Rudnitsky,
166a, Lenina St., Kirov, Russia, 610007,
²Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
e-mail: aleshirokikh@yandex.ru

Myxomycete communities are an integral component of forest biocenoses. For the first time, a comparative study of the composition and biodiversity of myxomycete complexes was carried out on the example of two sites of the Nurgush Reserve. It was found that the species diversity of myxomycetes is higher at the Nurgush site, and the interspecific associations of these organisms are more diverse at the Tulashor site. An important component of the myxomycete communities are lower and higher fungi. Micromycetes act as parasites, and higher fungi act as organisms that help myxomycetes to master new substrates, in particular, decomposing wood. An important component of communities are bacteria, which are not only a trophic resource for myxomycetes, but also contribute to their adaptation to the environment. Among the bacteria dominating in the composition of myxomycete communities, species synthesizing indole-3-acetic acid (IAA) – a phytohormone of auxin nature – are identified, in connection with which the sporophores of myxomycetes can be potential sources of biotechnologically valuable strains.

Keywords: myxomycetes, taxa, substrate complex, bacteria, micromycetes, fungi.

Миксомицеты или миксогастриды – одна из наиболее древних групп амёбидных организмов, возникшая до появления наземных растений. Главной особенностью миксомицетов является своеобразный жизненный цикл, включающий стадии, характерные как для грибов, так и для животных, а также ряд специфических фаз развития. Двойственная природа данных организмов определяет интерес к изучению этой очень немногочисленной группы (чуть более 1000 видов) как зоологами, так и микологами. В связи с этим существует две классификации – зоологическая и ботаническая. В зоологической классификации типичных миксомицетов включают в подкласс *Muxogastria*, входящий в состав класса *Eumycetozoea* [1, 2]. В соответствии с ботанической классификацией, миксомицеты являются представителями класса *Muxomycetes*, состоящего из трёх подклассов: *Ceratiomuxomycetidae*, *Muxogastromycetidae* и *Stemonitomycetidae* [3]. Однако систематика миксомицетов в связи с накоплением новых данных и развитием методов молекулярной филогении в настоящее время находится в процессе пересмотра и уточнения. На основании большого массива данных о последовательностях фрагмента гена 18S рРНК была предложена новая филогенетическая система для миксомицетов и родственных им организмов [4]. Эта система состоит из двух классов – *Muxomycetes* и *Ceratiomuxomycetes*. Класс *Muxomycetes* подразделяется на два подкласса – *Lucisporomycetidae* (светлоспоровые) и *Columellomycetidae* (колюмелловые). И хотя предлагаемая система ещё является предметом серьёзных дискуссий, накопление новых данных, полученных методами молекулярной филогении, позволяет более подробно детализировать родственные связи на уровне родов и видов.

Миксомицеты являются важным структурным компонентом лесных экосистем. Они принимают активное участие в процессах круговорота веществ и широко распространены в различных природно-климатических зонах практически всех материков, кроме Антарктиды. Наибольшее видовое богатство миксомицетов отмечается в смешанных и широколиственных лесах умеренной зоны [5]. Среди всего многообразия миксомицетов выделяют виды-космополиты, встречающиеся во всех наземных экосистемах: *Arcyria cinerea* (Bull.) Pers., *A. denudate* (L.) Wettst., *Stemonitopsis typhina* (Wigg.) Nann.-Bremek., *Fuligo septica* (L.) Wigg., *Lycogala epidendrum* (L.)

Fr., *Stemonitis fusca* Roth, *Trichia decipiens* (Pers.) Macbr. Вместе с тем, некоторые виды, особенно обитающие в тропиках и пустынях, имеют весьма ограниченные географические ареалы.

На распространение миксомицетов в экосистемах существенное влияние оказывают абиотические факторы: тип, кислотность субстрата и его способность удерживать воду, интенсивность и экспозиция освещения, для образцов коры – текстура поверхности, высота местообитания над землёй. Не менее важную роль играют и микроклиматические показатели – среднемесячные температуры, количество осадков в вегетационный период. Эти факторы неживой природы в той или иной степени способствуют формированию определённого видового состава комплекса миксомицетов в биоценозе.

С другой стороны, все организмы, входящие в состав экосистем, да и сами миксомицеты, выступают по отношению друг к другу как биотические факторы, существенно определяющие структуру комплекса миксомицетов в биоценозах. Некоторые миксомицеты могут тесно взаимодействовать друг с другом, образуя межвидовые сообщества, но характер межвидового взаимодействия в таких сообществах изучен слабо. Предполагают, что в них может происходить обмен генетической информацией между видами и это может служить одной из причин скрытого генетического разнообразия [6].

С другими представителями биотической составляющей экосистем – прокариотами и грибами (микро- и макромицетами), миксомицеты образуют различные биотические связи. Характер этих связей также недостаточно изучен и не вполне понятен. В основном они носят трофический, часто паразитический характер, но иногда это взаимодействие можно характеризовать как мутуализм.

Самые тесные ассоциации миксомицеты образуют с бактериями. Ещё в начале XX века было показано, что внутри и на поверхности спорофоров миксомицетов могут находиться бактерии [7]. В дальнейшем подтверждено, что на поверхности плодовых тел миксомицетов встречаются сообщества различных прокариот [8]. Для миксомицетов бактерии важны, прежде всего, в качестве трофического ресурса. На стадии плазмодия миксомицеты способны питаться бактериями широкого спектра видов и «запасать» их внутри плодовых тел, как трофический фонд для будущих поколений миксамёб [9, 10].

Более разнообразны в природных биоценозах взаимоотношения миксомицетов и грибов. Старые плодовые тела высших базидиальных грибов (особенно многолетние базидиомы трутовых грибов) могут являться субстратом для обитания миксомицетов. В то же время спорофоры миксомицетов сами служат хорошим субстратом, который различные грибы могут успешно колонизировать. Большинство микроскопических видов, развивающихся на спорофорах миксомицетов, представлены несовершенными грибами (*Deuteromycetes*), реже – аскомицетами. Некоторые из дейтеромицетов являются бесполоыми стадиями аскомицетов. В исследованиях, проведённых в лесах умеренного пояса (Аляска, Север Франции, Северо-Запад Индии, Новая Зеландия), на спорофорах различных миксомицетов были обнаружены представители 26 таксонов микроскопических грибов, среди которых 11 никогда ранее не описывались как ассоцианты миксомицетов [11]. Высокое видовое разнообразие микромицетов свидетельствует о привлекательности спорофоров как пищевого субстрата для грибов, взаимоотношения миксомицетов с микроскопическими грибами в этом случае можно рассматривать как трофические.

У грибов, колонизирующих спорофоры, наблюдается приуроченность к определённым видам миксомицетов. Например, на спорофорах представителей родов *Comatricha* и *Stemonitis* иногда можно наблюдать белый налёт, представляющий собой разрастание мицелия *Verticillium rexiianum* (Sacc.) Sacc., Syll. Fung. Спорофоры представителей порядка *Physarales* преимущественно колонизируются микромицетами *Gliocladium album* (Preuss) Petch и *Sesquicillium microsporum* (Jaap) Veenbaas Rijks & W. Gams in Gams, спорофоры порядка *Trichiales* – исключительно *Polycephalomyces tomentosus* (Schrad.: Fr.) [11].

Кроме трофических взаимоотношений миксомицеты могут образовывать с грибами синэкологические связи. Например, было отмечено, что миксомицеты не могут расселяться на неповреждённой древесине, но, если древесина уже частично подверглась деструкции высшими базидиальными или аскомицетными грибами, миксомицеты способны её колонизировать [12].

Многообразие возможных взаимодействий миксомицетов с другими компонентами биоты может определяться общей спецификой биогеоценоза. Целью нашей работы являлось изучение ассоциаций миксомицетов с неко-

торыми из биотических компонентов лесных биоценозов на территории Государственного природного заповедника «Нургуш». В частности, исследовали видовой состав бактерий и грибов, обитающих в сообществах миксомицетов, для выявления характера их ассоциативных связей.

Объекты и методы исследования

Государственный природный заповедник «Нургуш» расположен на территории Кировской области и состоит из двух участков: собственно участок «Нургуш» и участок «Тулашор». Участок «Нургуш» расположен в юго-восточной части Котельничского района в пойме реки Вятки и представляет собой сплошной массив коренных широколиственных лесов возрастом 7–10 тыс. лет. Участок «Тулашор» расположен на северо-западе Нагорского района на границе с республикой Коми и является самым южным из ныне сохранившихся массивов старовозрастных лесов в Европе, представлен спелыми и перестойными ельниками и смешанными лесами, находящимися на разных стадиях возрастной динамики (<https://nurgush.org/>).

Результаты первых миксологических исследований на территории участка «Нургуш» были представлены ранее [13]. В данной работе регистрацию сообществ миксомицетов в полевых условиях и сбор образцов спорофоров проводили в летне-осенний период 2014–2020 гг. маршрутным методом на территории обоих участков заповедника «Нургуш». Обследование территории заповедника осуществлялось по трём маршрутам, включающим 20 площадок наблюдений на участке «Нургуш» и по пяти маршрутам, включающим 27 площадок наблюдений на участке «Тулашор». На площадках обследовали поваленные и гниющие стволы деревьев, пни, валежник, мох, подстилку, проводили предварительную идентификацию обнаруженных миксомицетов и отбирали образцы спорофоров и субстратов для изучения в условиях лаборатории.

В лаборатории образцы различных собранных субстратов помещали во влажные камеры и инкубировали в течение 2-х месяцев. Это позволяло дополнительно регистрировать виды миксомицетов, которые не обнаруживались в полевых условиях. Видовую принадлежность определяли по морфологическим характеристикам спороношений [14–16].

Для выделения бактерий 5–6 спорофоров миксомицетов семейства *Trichiaceae* стерилизовали 75% этанолом в течение двух минут, затем промывали стерильной водой. Контроль стерилизации осуществляли посредством посева промывных вод на глюкозо-пептонный агар с дрожжевым экстрактом (ГПД). Для визуализации бактерий внутри стерильных спорофоров готовили препарат «раздавленная капля», окрашивали его акридиновым оранжевым (1 : 1000) и микроскопировали с помощью люминесцентного микроскопа «Leica DM 2500». Для выделения и идентификации бактерий поверхностно стерилизованные спорофоры разрушали пестиком в ступке с 1 мл стерильной воды и готовили серию десятикратных разведений. Полученную суспензию в разведениях 10^{-4} или 10^{-5} высевали по 0,1 мл на метанольный агар Канада и ГПД [17]. Чашки с посевами инкубировали при 25 °С в течение 7 сут. Бактерии из колоний доминирующих морфотипов отсеивали на кривой агар, соответствующий по составу средам выделения. Таксономическую принадлежность бактериальных изолятов устанавливали на основании анализа фрагментов гена 16S рРНК в НПО «Синтол» (г. Москва). Полученные последовательности нуклеотидов фрагмента гена 16S рРНК выравнивали с помощью программы множественного выравнивания AlignX Vector NTI 9.0. Принадлежность микроорганизма к тому или иному таксону устанавливали с помощью пакета программ BLAST. Достоверным свидетельством того, что фрагмент принадлежит определённому микроорганизму, считали совпадение его нуклеотидной последовательности 16S рРНК с последовательностью 16S рРНК, представленной в базе данных NCBI, более чем на 97%.

Плодовые тела миксомицетов, поражённые мицелием микроскопических грибов, изучали под микроскопом Leuca DM 2500 при увеличении 200 с целью идентификации грибов по микроморфологическим признакам.

Если же идентифицировать грибы при прямом микроскопировании не удавалось, то спорофоры миксомицетов высевали на солодовый агар и культивировали при температуре 22–25 °С до появления грибных колоний. Идентификацию грибов по культурально-морфологическим признакам производили с использованием ключей, опубликованных в работе [11].

Результаты и обсуждение

В результате маршрутных исследований, проведённых в период с 2014 по 2017 гг., на территории участка «Нургуш» было обнаружено 29 видов миксомицетов, относящихся к 5 порядкам и 7 семействам [18]. При обследовании участка «Тулашор» в 2018–2020 гг. общий список обнаруженных миксомицетов расширился до 34 видов. Из общего числа зарегистрированных видов 9 видов миксомицетов были обнаружены только при культивировании субстратов во влажных камерах.

Для анализа особенностей распространения миксомицетов в лесном биогеоценозе все субстраты, собранные на территории обследованных участков, объединили в три группы. В соответствии с характером субстратов выделили миксомицетные комплексы: ксилобионтный, подстилочный и эпифитный. Деление видов миксомицетов на субстратные комплексы носит условный характер, так как часто отдельные виды или разные стадии развития одного вида могут встречаться или проходить на разных субстратах.

Ксилобионтный субстратный комплекс является самым обильным по количеству видов на обоих участках заповедника (табл. 1).

Большое количество упавших стволов деревьев и гниющей древесины обеспечивают формирование высокого видового разнообразия миксомицетов-ксилобионтов. Значительное количество обнаруженных видов принадлежит семействам Arcyriaceae и Physaraceae, представители которых обычно приурочены

Таблица 1 / Table 1

Субстратные комплексы миксомицетов на двух участках заповедника «Нургуш» (виды/проценты)
Substrate complexes of myxomycetes on two sites of the Nurgush Nature Reserve (species/percentages)

Участки заповедника Areas of the reserve	Ксилобионтный комплекс Xylobiont complex	Эпифитный комплекс Epiphytic complex	Подстилочный комплекс Litter complex	Виды, составляющие ядро биоты Species of biota core
Нургуш Nurgush	21/61,8	2/5,8	11/32,4	12
Тулашор Tulashor	20/83,0	4/17	0/0	7

Таблица 2 / Table 2

Таксономическая структура биоты миксомицетов участков «Нургуш» и «Тулашор»
Taxonomic structure of the biota of the myxomycetes of the Nurgush and Tulashor site

Показатели / Indicators	Участки / Plots	
	«Нургуш» / Nurgush	«Тулашор» / Tulashor
Число порядков / Number of orders	5	5
Число семейств / Number of families	7	7
Число родов / Number of genera	19	18
Число видов / Number of species	34	24
Среднее число видов в семействе Average number of species in a family	4,8	4,0
Среднее число родов в семействе Average number of genera in a family	3,1	3,0
Среднее число видов в роде Average number of species in the genus	1,9	1,4

к гнилой древесине лиственных и хвойных пород деревьев. Количество видов миксомицетов ксилобионтного комплекса было практически одинаково на обоих участках, однако доля ксилобионтов в общем количестве выявленных видов выше на участке «Тулашор». Лесной биоценоз участка «Нургуш» представлен в основном широколиственными деревьями (дуб, липа, осина, берёза) и имеет хорошо сформированную листовую подстилку, обладающую собственным комплексом миксомицетов, практически отсутствующим в «Тулашоре». На участке «Тулашор» на месте подстилки развит почвенный ярус, представленный печёночными и листостебельными мхами, обитатели которого формируют эпифитный комплекс.

В эпифитном комплексе участка «Нургуш» было зарегистрировано два вида миксомицетов – *Mucilago crustacea* и *Leocarpus fragilis*, тогда как на участке «Тулашор» в эпифитном комплексе наряду с названными отмечены ещё *Fuligo septica* и *Physarum album*. Большинство видов миксомицетов, обнаруженных в эпифитном и подстилочном комплексах, часто встречаются и на других субстратах. В подстилочном комплексе участка «Нургуш» отмечены представители порядков Physarales и Trichiales, широко распространённые и на других субстратах.

Ядро биоты миксомицетов на участке «Нургуш» составляют 12 видов, а на участке «Тулашор» в 1,5 раз меньше – 7 видов, но доля ксилобионтных видов в общем количестве зарегистрированных миксомицетов выше. По другим параметрам структура биоты миксомицетов на обоих участках имеет высокое сходство (табл. 2).

На обоих участках заповедника были обнаружены многовидовые сообщества миксомицетов, состоящие в основном из представи-

телей порядка Trichiales (рис. а, б; см. цветную вкладку VI). Эти сообщества встречались на полусгнивших стволах осины, берёзы, липы, как правило, с нижней стороны стволов или на торцевой части брёвен. На территории «Нургуш» примерно 30% от всех обнаруженных миксомицетов входили в состав межвидовых сообществ, которые включали, как правило, два, реже – три вида. Ядром сообщества являлась *Metatrachia vesparia*, а видами спутниками – *Trichia favoginea*, *T. scabra*, реже *T. decipiens*. По краю колоний миксомицетов располагались микроскопические плодовые тела базидиального гриба *Henningsomyces candidus* (Pers.) Kuntze. Поскольку спорофоры миксомицетов не были поражены мицелием гриба и выглядели совершенно не повреждёнными, то можно полагать, что их взаимоотношения не являются паразитическими.

Из аскомицетов в межвидовых сообществах миксомицетов часто обнаруживался сапротрофный гриб *Scutellinia scutellata* (L.) Lambotte. Красные апотеции *S. scutellata* постоянно встречаются на гниющей древесине – типичном местообитании миксомицетов (рис. в; см. цветную вкладку VI). В ярко окрашенных апотециях этого гриба обнаружены, по данным молекулярной филогении, бактерии порядков Sphingobacteriales, Burkholderiales, Rhizobiales, некоторые виды бактерий из этих порядков являются симбионтами *S. scutellata* [19]. В спорофорах трихий также были обнаружены бактерии, принадлежащие порядкам Sphingobacteriales и Burkholderiales. Возможно, данный аскомицет является источником бактерий, полезных для миксомицетов.

На отдельных спорофорах миксомицетов, отнесённых к порядку Trichiales, обнаруживались спороношения *Polycephalomyces tomentosus* (Schrad.: Fr.), который является

А. А. Широких, И. Г. Широких
 «Ассоциации миксомицетов в лесных биоценозах
 (на примере заповедника «Нургуш»)». С. 150.



Рис. Миксобиота заповедника «Нургуш»: а и б – многовидовые сообщества трихий; в – аскомицетный гриб *Scutellinia scutellate*; г – поражение спорофора *Hemitrichia serpula* мицелием паразитического гриба *Polycephalomyces tomentosus*; д – штабеля полусгнивших брёвен на участке «Тулашор»; е – аскомицетный гриб *Catinella olivacea* в сообществе миксомицета *Metatrichia vesparia*

Fig. Мухобиота of the Nurgush Reserve: a and б – multi-species communities of *Trichia*; в – ascomycete *Scutellinia scutellate*; г – defeat of the sporophore *Hemitrichia serpula* by mycelium of the parasitic fungus *Polycephalomyces tomentosus*; д – stacks of half-rotted logs at the Tulashor site; е – ascomycete fungus *Catinella olivacea* in the myxomycete community *Metatrichia vesparia*

специфическим паразитом представителей этого порядка [11]. Гифы гриба *P. tomentosus* проникают в споровую массу миксомицетов, где они вторгаются в протопласты отдельных спор и, в конечном итоге, делают их нежизнеспособными (рис. г; см. цветную вкладку VI). Грибковые поражения спорофоров трихий в 97% образцов были представлены *P. tomentosus*.

Межвидовые сообщества на территории участка «Тулашор» встречались чаще, чем на участке «Нургуш». Примерно 50% обнаруженных колоний миксомицетов были представлены ассоциациями, состоящими из 3 или 4 видов. Обилие многокомпонентных сообществ миксомицетов можно объяснить тем, что на участке «Тулашор» ранее проводились лесозаготовки, поэтому повсюду встречаются штабеля полусгнивших стволов малоценных пород деревьев – берёзы и осины (рис. д; см. цветную вкладку VI). Эти содержащие большое количество влаги стволы, поросшие мхом и лишайниками, представляют хорошую экологическую нишу для миксомицетов. В результате высокой концентрации подходящих субстратов и соответствующих экологических условий в штабелях полусгнивших древесных стволов отмечено обильное развитие и видовое разнообразие этих организмов.

Как и на участке «Нургуш», основу межвидовых сообществ миксомицетов в «Тулашоре» составляла *M. vesparia*. Разрастания плодовых тел этого миксомицета обычно располагались на торцевой поверхности полусгнивших брёвен, спорофоры сопутствующих видов – *T. scabra*, *T. favoginea*, *T. varia*, были вкраплены в биомассу *M. vesparia*. Спорофоры трихий находились на разных стадиях зрелости, некоторые были ещё белыми, другие уже приобрели жёлтую окраску. Конкуренционных взаимоотношений между миксомицетами разных видов в этих сообществах не наблюдалось.

Поверхность древесины, на которой располагались сообщества миксомицетов порядка Trichiales, была покрыта мицелием микроскопических грибов, видимым невооружённым глазом. При его прямом микроскопировании выявлены представители рода *Verticillium*. В литературе имеются сведения, что грибы *Verticillium* паразитируют на многих видах миксомицетов [11], однако в многовидовых сообществах трихий мы не обнаружили спорофоров, поражённых этими грибами.

Кроме миксомицетов, в сообществах трихий располагались плодовые тела (апотеции)

и высших грибов аскомицетов. Так, были обнаружены плодовые тела *Catinella olivacea* (Batsch) Boud, *Lasiobelonium loniceriae* (Alb. & Schwein.) Raitv. и *S. scutellata*. Наиболее часто, по сравнению с другими аскомицетами, в многовидовых сообществах трихий встречался дискомицетный гриб *C. olivacea* (рис. е; см. цветную вкладку VI), который обычно плодоносит в полостях гниющих брёвен [20]. Поэтому местообитания этого гриба укрыты от воздушных потоков, на которые другие виды дискомицетов обычно «полагаются» при распространении спор, вследствие чего этот вид использует альтернативную стратегию расселения. В лабораторных опытах с чистой культурой *C. olivacea* было показано, что эпителий при созревании оставался студенистым и захватывал в слизистую массу аскоспоры [21]. Авторы интерпретировали этот феномен как адаптацию к распространению аскоспор членистоногими.

Плодовые тела миксомицетов служат трофическим ресурсом для многих видов членистоногих – коллембол и жёсткокрылых. Коллемболы разных таксонов часто обнаруживаются на спорофорах в колониях миксомицетов [22, 23]. Вероятно, миксомицеты для них являются не только трофическим ресурсом, но и своеобразным укрытием. На плодовых телах миксомицетов часто встречаются жуки [24, 25]. Как правило, это представители тех же самых семейств жёсткокрылых, которые встречаются и на настоящих грибах [26]. Чаще всего это виды из семейств Scaphidiidae, Staphilinidae, Clambidae и некоторые другие [27]. Очевидно, многие виды из этих семейств являются облигатными миксомицетофагами. Споры миксомицетов, прошедшие через пищеварительный тракт жуков и там не переварившиеся, прорастают в результате кислотного воздействия активнее, чем интактные.

Так как все стадии жизненного цикла миксомицетов проходят в местообитаниях, где бактерии встречаются в изобилии, то не удивительно, что на поверхности их плодовых тел обнаруживается довольно широкий видовой спектр бактерий, а их численность сопоставима с численностью в верхнем горизонте почвы [8].

Внутри поверхностно стерилизованных спорофоров обнаружены в основном представители классов: Sphingobacteria, Alphaproteobacteria и Gammaproteobacteria и четырёх порядков (табл. 3). Все выявленные виды, кроме *Arthrobacter humicola*, являлись граммотрицательными неспорообразующими

Таблица 3 / Table 3

Бактерии, изолированные из стерильных спорофоров некоторых миксомицетов
Bacteria isolated from sterile sporophores of some мухомыцетов

№ No.	Виды миксомицетов Мухомыцетов species	Класс Class	Порядок Order	Семейство Family	Виды бактерий Bacteria species
1	<i>Hemitrichia serpula</i>	Actynomycetes	Micrococcales	Micrococcaceae	<i>Arthrobacter humicola</i>
2	<i>Trichia decipiens</i>	Sphingobacteriaiia	Sphingobacteriales	Sphingobacteriaceae	<i>Pedobacter agri</i>
3	<i>Metatrichia vesparia</i>				<i>Sphingobacterium kitahiroshimense</i>
4	<i>T. decipiens</i>				Alphaproteobacteria
5	<i>Lycogala epidendrum</i>	<i>M. bullatum</i>			
6	<i>L. epidendrum</i>	<i>M. bullatum</i>			
7	<i>L. epidendrum</i>	<i>M. radiotolerans</i>			
8	<i>M. vesparia</i>	Gammaaproteobacteria	Enterobacteriales	Yersiniaceae	<i>Ewingella americana</i>

Таблица 4 / Table 4

Количество бактериальных изолятов из спорофоров, способных к синтезу ИУК в количествах выше 15 мкг/мл / The number of bacterial isolates from sporophores capable of synthesizing IUC in amounts over 15 µg/mL

№ No.	Миксомицет Мухомыцете	Общее количество изолятов бактерий Total number of bacterial isolates	Доля бактерий, продуцирующих ИУК, % The proportion of bacteria producing IAA, %	Уровень синтеза ИУК, мкг/мл IAA synthesis level, mµ/mL
1	<i>H. serpula</i>	12	51	20,5
2	<i>L. epidendrum</i>	12	52	23,4
3	<i>T. decipiens</i>	16	0,1	33,4
4	<i>M. vesparia</i>	10	0,1	15,1

бактериями. Не обнаружено какой-либо видовой приуроченности между миксомицетами и видами бактерий. Однако, в образцах этилов *L. epidendrum*, в основном, обнаруживались розовоокрашенные факультативные метилотрофные бактерии с доминированием вида *Methylobacterium bullatum*.

Известно, что плазмодии миксомицетов, культивируемые в лабораторных условиях, тесно связанные с одним видом бактерий, получили название моноксенные плазмодии [12]. Эти ассоциации бактерий и миксомицетов оказались невидоспецифичны. Бактерии можно было легко выделить в чистую культуру. Дальнейшие исследования, проведенные с моноксенными плазмодиями, показали, что такие ассоциации способны фиксировать молекулярный азот, продуцировать внеклеточные ферменты и разлагать определённые виды древесины и подстилки, а также толерантны к высоким концентрациям различ-

ных химических загрязнителей. При этом бактериальный компонент таких ассоциаций не проявлял ни одного из этих свойств в чистой культуре. Таким образом, ассоциация придавала организмам определённые свойства, не проявляющиеся у партнёров по отдельности. При последующем развитии плазмодия в спорофоры бактериальный компонент, обеспечивающий миксомицетам необходимые для адаптации свойства, передавался последующим поколениям.

При изучении свойств бактериальных изолятов из спорофоров миксомицетов, собранных в условиях средней полосы России, мы предположили, что среди них могут также оказаться штаммы с ценными свойствами, например, обладающие способностью синтезировать индол-3-уксусную кислоту (ИУК), способствующую росту растений.

Для выделения и изучения бактерий, способных к синтезу ИУК, были выбраны спо-

роношения миксомицетов, наиболее широко распространённых в лесных экосистемах. Как видно из таблицы 4, более половины изолятов из спорофоров *H. serpula* и *L. epidendrum* способны к синтезу ИУК, при этом максимальный уровень синтеза составил 23,4 мкг/мл культуральной жидкости. В спорофорах трихий доля бактерий, способных к синтезу ИУК, была значительно меньше – около 0,1%, однако у некоторых штаммов накопление ИУК в культуральной жидкости достигало 33,4 мкг/мл. Таким образом, спорофоры миксомицетов можно рассматривать как перспективный источник в поиске бактерий с фиторегуляторными свойствами для использования в агротехнологиях.

Заключение

На двух участках заповедника «Нургуш» впервые проведено сравнительное изучение биоразнообразия миксомицетных комплексов. Показано, что уровень биоразнообразия миксомицетов на участке «Нургуш» выше, по сравнению с участком «Тулашор». Многовидовые сообщества миксомицетов и других представителей биоты, входящих в их состав, более разнообразны на участке «Тулашор». Ассоциативные связи грибов и бактерий, входящих в состав многовидовых сообществ миксомицетов, не всегда носят трофический характер. Если миксомицеты чаще выступают как паразиты миксомицетов, разрушая их споронии, то высшие грибы способствуют заселению миксомицетами древесных субстратов, подвергая их начальному разложению и делая древесину более доступной для колонизации миксомицетами. Кроме того, членистоногие, используя плодовые тела миксомицетов в качестве источника питания и мест укрытия, способствуют распространению их спор, а также спор высших грибов. Бактерии, входящие в состав межвидовых ассоциаций, для миксомицетов представляют собой не только пищевой ресурс, но и обеспечивают их адаптацию к условиям местообитания, активизируя синтез биологически активных веществ, например, ИУК – соединения класса ауксинов. В связи с этим спорофоры миксомицетов являются потенциальным источником для поиска новых штаммов бактерий с биотехнологически ценными свойствами.

Литература

1. Olive L.S. The Mycetozoans. N.Y.: Acad. Press, 1975. 360 p.

2. Новожилов Ю.К., Гудков А.В. Mycetozoa // Протисты / Под ред. С.А. Карпова. СПб.: Наука, 2000. С. 417–450.

3. Lado C., Eliasson U. Taxonomy and systematics: current knowledge and approaches on the taxonomic treatment of Myxomycetes // Myxomycetes: Biology, Systematics, Biogeography, and Ecology. London: Academic Press, 2017. P. 205–251.

4. Leontyev D.V., Schnittler M., Stephenson S.L., Novozhilov Y.K., Shchepin O.N. Towards a phylogenetic classification of the Myxomycetes // Phytotaxa. 2019. V. 399. No. 3. P. 209–238.

5. Stephenson S.L., Schnittler M., Novozhilov Y.K. Myxomycete diversity and distribution from the fossil record to the present // Biodivers. Conserv. 2008. V. 17. No. 2. P. 285–301.

6. Новожилов Ю.К. Проблема скрытого разнообразия миксомицетов (Myxomycetes = Myxogastria): таксономический и экологический аспекты // Концепции вида у грибов: новый взгляд на старые проблемы: Материалы VIII всероссийской микологической школы-конференции с международным участием. М.: Звенигородская биостанция МГУ им. С.Н. Сكاдовского, 2017. С. 47–54.

7. Ячевский А.А. Микологическая флора Европейской и Азиатской России. Слизевики. М.: Типо-литография В. Рихтера, 1907. 410 с.

8. Сизов Л.Р., Захарова Н.Б., Лысак Л.В., Гмошинский В.И. Микробные сообщества на плодовых телах миксомицетов в лесном фитоценозе // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический. 2020. Т. 125. № 5. С. 29–35.

9. Cohen A.L. Nutrition of the myxomycetes. II. Relations between plasmodia, bacteria, and substrate in two-membered culture // Botanical Gazette. 1941. V. 103. No. 2. P. 205–224.

10. DiSalvo S., Haselkorn T.S., Bashir U., Jimenez D., Brock D.A., Queller D.C., Strassmann J.E. *Burkholderia* bacteria infectious induce the proto-farming symbiosis of *Dictyostelium* amoebae and food bacteria // PNAS. 2015. V. 112. No. 36. P. 5029–5037.

11. Rogerson C.T., Stephenson S.L. Myxomyceticolous fungi // Mycologia. 1993. V. 85. No. 3. P. 456–469.

12. Kalyanasundram I. A positive ecological role for tropical myxomycetes in association with bacteria // Systematics and Geography of Plants. 2004. V. 74. No. 2. P. 239–242.

13. Широких А.А. Миксомицеты заповедной территории «Нургуш» // Теоретическая и прикладная экология. 2013. № 2. С. 136–142.

14. Новожилов Ю.К. Определитель грибов России. Отдел Слизевики. Вып. 1. Класс Миксомицеты. СПб.: Наука, 1993. 288 с.

15. Гмошинский В.И., Дунаев Е.А., Киреева Н.И. Определитель миксомицетов Московского региона. Учебно-методическое пособие. М.: Культурно-просветительский центр «Архэ», 2021. 388 с.

16. DISCOVER LIFE [Электронный ресурс] <https://www.discoverlife.org/> (Дата обращения: 25.03.2023).

17. Практикум по микробиологии / Под ред. А.И. Нетрусова. М.: Издательский центр «Академия», 2005. 608 с.

18. Широких А.А. Миксомицеты заповедника «Нургуш». Киров: Издательство «Старая Вятка», 2018. 95 с.

19. Giordano R., Nardi J.B., Bee C.M., Miller L.A., Raja H. Bacterial symbionts that inhabit apothecia of the cup fungus *Scutellinia scutellata* // *Nova Hedwigia*. 2013. V. 97. No. 1–2. P. 1–18.

20. Durand E.J. The genus *Catinella* // *Bulletin of the Torrey Botanical Club*. 1922. No. 49. P. 15–21.

21. Greif M.D., Gibas C.F.C., Tsuneda A., Currah R.S. Ascoma development and phylogeny of an apothecioid dothideomycete, *Catinella olivacea* // *American Journal of Botany*. 2007. V. 94. No. 11. P. 1890–1899.

22. Ванявина Л.В. Группировки эпигейных коллембол (Collembola) (Московская область). 1. Структура и динамика в луговых и лесных биотопах // *Зоологический журнал*. 2012. Т. 91. № 10. С. 1171–1171.

23. Богатырёва В.Ю., Потапов А.М. Neanuridae (Collembola) как полифаги высокого трофического уровня // *Проблемы почвенной зоологии*. М.: Товарищество КМК, 2018. С. 37–37а.

24. Newton A.F., Stephenson S.L. A beetle/slime mold assemblage from Northern India (Coleoptera; Myxomycetes) // *Oriental Insects*. 1990. V. 24. No. 1. P. 197–218.

25. Stephenson S.L., Wheeler Q.D., McHugh J.V., Fraissinet P.R. New North American associations of Coleoptera with Myxomycetes // *J. of Nat. Hist.* 1994. V. 28. No. 4. P. 924–936.

26. Котеленец Н.Н., Барсукова Т.Н. Миксомицеты и миксомицетофильные жуки в Окском государственном биосферном заповеднике // *Микология и фитопатология*. 2003. Т. 37. № 1. С. 50–53.

27. Перковский Е.Э., Кривомаз Т.И. Особенности миксомицетофагии жуков-лейодид подродов *Cyphocele* и *Neocele* рода *Agathidium* (Coleoptera, Leioididae) // *Vestnik zoologii*. 2000. V. 34. No. 1–2. P. 103–108.

References

1. Olive L.S. *The Mycetozoans*. N.Y.: Acad. Press, 1975. 360 p.

2. Novozhilov Y.K., Gudkov A.V. *Mycetozoa* // *Protists* / Ed. S.A. Karpov. Sankt-Peterburg: Nauka, 2000. P. 417–450 (in Russian).

3. Lado C., Eliasson U. Taxonomy and systematics: current knowledge and approaches on the taxonomic treatment of Myxomycetes // *Myxomycetes. Biology, Systematics, Biogeography, and Ecology*. London: Academic Press, 2017. P. 205–251. doi: 10.1016/b978-0-12-805089-7.00007-x

4. Leontyev D.V., Schnittler M., Stephenson S.L., Novozhilov Y.K., Shchepin O.N. Towards a phylogenetic

classification of the Myxomycetes // *Phytotaxa*. 2019. V. 399. No. 3. P. 209–238. doi: 10.11646/phytotaxa.399.3.5

5. Stephenson S.L., Schnittler M., Novozhilov Y.K. Myxomycete diversity and distribution from the fossil record to the present // *Biodivers. Conserv.* 2008. V. 17. No. 2. P. 285–301. doi: 10.1007/s10531-007-9252-9

6. Novozhilov Y.K. The problem of the latent diversity of myxomycetes (Myxomycetes = Myxogastria): taxonomic and ecological aspects // *Species concepts in fungi: a new look at old problems: Proceedings of the VIII All-Russian Mycological School-Conference with international participation*. Moskva: Zvenigorodskaya biostantsiya MGU im. S.N. Skadovskogo, 2017. P. 47–54 (in Russian).

7. Yachevskiy A.A. *Mycological flora of European and Asian Russia. Slime molds*. Moskva: Tipo-litografiya V. Rikhtera, 1907. 410 p. (in Russian).

8. Sizov L.R., Zakharova N.B., Lysak L.V., Gmoshinsky V.I. Microbial communities on fruit bodies of myxomycetes in forest phytocenosis // *Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Biological series*. 2020. V. 125. No. 5. P. 29–35 (in Russian).

9. Cohen A.L. Nutrition of the myxomycetes. II. Relations between plasmodia, bacteria, and substrate in two-membered culture // *Botanical Gazette*. 1941. V. 103. No. 2. P. 205–224.

10. DiSalvo S., Haselkorn T.S., Bashir U., Jimenez D., Brock D.A., Queller D.C., Strassmann J.E. *Burkholderia* bacteria infectiously induce the proto-farming symbiosis of *Dictyostelium* amoebae and food bacteria // *PNAS*. 2015. V. 112. No. 36. P. 5029–5037. doi: 10.1073/pnas.1511878112

11. Rogerson C.T., Stephenson S.L. Myxomyceticoles fungi // *Mycologia*. 1993. V. 85. No. 3. P. 456–469. doi: 10.1080/00275514.1993.12026296

12. Kalyanasundram I. A positive ecological role for tropical myxomycetes in association with bacteria // *Systematics and Geography of Plants*. 2004. V. 74. No. 2. P. 239–242. doi: 10.2307/3668492

13. Shirokikh A.A. Myxomycetes of the protected area “Nurgush” // *Theoretical and Applied Ecology*. 2013. No. 2. P. 136–142 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2013-2-136-142

14. Novozhilov Y.K. Key to mushrooms of Russia. Slime mold department. No. 1. Class Myxomycetes. Sankt-Peterburg: Nauka, 1993. 288 p. (in Russian).

15. Gmoshinsky V.I., Dunaev E.A., Kireeva N.I. Key to myxomycetes of the Moscow Region. Moskva: Cultural and educational center “Arkhe”, 2021. 388 p. (in Russian).

16. DISCOVER LIFE [Internet resource] <https://www.discoverlife.org/> (Accessed: 25.03.2023).

17. Workshop on microbiology / Ed. A.I. Netrusov. Moskva: Publishing Center “Academy”, 2005. 608 p. (in Russian).

18. Shirokikh A.A. Myxomycetes of the Nurgush Reserve. Kirov: Staraya Vyatka, 2018. 95 p. (in Russian).

19. Giordano R., Nardi J.B., Bee C.M., Miller L.A., Raja H. Bacterial symbionts that inhabit apothecia of the cup fungus *Scutellinia scutellata* // *Nova Hedwigia*. 2013. V. 97. No. 1-2. P. 1–18. doi: 10.1127/0029-5035/2013/0102
20. Durand E.J. The genus *Catinella* // *Bulletin of the Torrey Botanical Club*. 1922. No. 49. P. 15–21.
21. Greif M.D., Gibas C.F.C., Tsuneda A., Currah R.S. Ascoma development and phylogeny of an apothecioid dothideomycete, *Catinella olivacea* // *American Journal of Botany*. 2007. V. 94. No. 11. P. 1890–1899. doi: 10.3732/ajb.94.11.1890
22. Vanyavina L.V. Groups of epigeal springtails (Collembola) (Moscow region). 1. Structure and dynamics in meadow and forest biotopes // *Zoological Journal*. 2012. V. 91. No. 10. P. 1171–1171 (in Russian).
23. Bogatyreva V.Y., Potapov A.M. Neanuridae (Collembola) as polyphages of a high trophic level // *Problems of Soil Zoology*. Moskva: Tovarishchestvo KMK, 2018. P. 37–37a (in Russian).
24. Newton A.F., Stephenson S.L. A beetle/slime mold assemblage from Northern India (Coleoptera; Myxomycetes) // *Oriental Insects*. 1990. V. 24. No. 1. P. 197–218. doi: 10.1080/00305316.1990.11835535
25. Stephenson S.L., Wheeler Q.D., McHugh J.V., Fraissinet P.R. New North American associations of Coleoptera with Myxomycetes // *J. of Nat. Hist.* 1994. V. 28. No. 4. P. 921–936. doi: 10.1080/00222939400770491
26. Kotelenets N.N., Barsukova T.N. Myxomycetes and myxomycetophilous beetles in the Oksky State Biosphere Reserve // *Mykology and Phytopathology*. 2003. V. 37. No. 1. P. 50–53.
27. Perkovsky E.E., Krivomaz T.I. Peculiarities of mixomycetophagy in leiodid beetles of the subgenera *Cyphocele* and *Neocele* of the genus *Agathidium* (Coleoptera, Leiodidae) // *Vestnik zoologii*. 2000. V. 34. No. 1–2. P. 103–108 (in Russian).

Изменения функционального статуса растительных сообществ вдоль высотного градиента на Северном и Приполярном Урале

© 2023. А. Б. Новаковский, к. б. н., н. с.,
Ю. А. Дубровский, к. б. н., н. с., Е. Е. Кулюгина, к. б. н., н. с.,
С. В. Дёгтева, д. б. н., член-корр., г. н. с.,
Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: novakovsky@ib.komisc.ru

Теория Раменского-Грайма (CSR-теория) широко применяется в современной экологии растений для описания высокоуровневых процессов, протекающих в растительных сообществах. В настоящем исследовании оцениваются, насколько наблюдаемые в ходе полевых исследований зависимости вдоль выраженного высотного градиента совпадают с теоретически предсказанными изменениями, и являются ли эти изменения одинаковыми для всех типов растительности. Изучено 275 геоботанических описаний пяти основных типов растительных сообществ Северного и Приполярного Урала (Россия): лесов, лугов, кустарниковой растительности, болот и горных тундр. На основе классификации Дж. Грайма методом взвешенного среднего каждому описанию был проставлен CSR-балл. Затем методами обобщённых аддитивных моделей и линейного моделирования была проанализирована взаимосвязь между CSR-баллами, типами растительности и высотой над уровнем моря. Растительные сообщества характеризовались преобладанием видов с конкурентной (С) и стресс-толерантной (S) стратегиями с небольшой долей рудеральных (R) видов. По снижению доли конкурентов и увеличению стресс-толерантов типы растительности ранжировались следующим образом: леса (С: 47, S: 44), луга (С: 47, S: 37), кустарниковая растительность (С: 44, S: 46), болота (С: 42, S: 49) и горные тундры (С: 35, S: 58). Разные типы растительности по-разному реагировали на изменения высоты расположения. Луга, кустарниковая растительность и горные тундры продемонстрировали наиболее соответствующее предсказаниям CSR-теории поведение: значительное снижение С и увеличение S-компоненты (4–5% на каждые 100 м высоты). Леса и болота не показали заметных изменений CSR-баллов с высотой.

Ключевые слова: жизненные стратегии, функциональные показатели растений, высотный градиент, горные сообщества.

Altitudinal variation in ecological strategies across plant communities of different vegetation types

© 2023. A. B. Novakovskiy ORCID: 0000-0003-4105-7436*
Yu. A. Dubrovskiy ORCID: 0000-0002-7219-054X*
E. E. Kulygina ORCID: 0000-0001-5097-1372*
S. V. Degteva ORCID: 0000-0003-3641-6123*
Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: novakovsky@ib.komisc.ru

Grime's CSR (competition-stress-ruderality) theory has found widespread use in modern ecology for the analysis of vegetation worldwide. This study aimed to verify if vegetation behavior predicted by this theory coincided with field observations along a highly pronounced altitudinal gradient and to determine if this behavior is the same for different vegetation types. We studied the 275 plots of different vegetation types in the Northern and Subpolar Urals (Russia). Based on the community-weighted mean approach, we allocated the CSR status of each plot. Then, we used generalized additive models and linear modeling to find relationships between CSR statuses, vegetation types and altitude. The plant communities were characterized by a predominance of species with competitor (C) and stress-tolerant (S) strategies and a small share of ruderal (R) species. According to the decrease in the share of competitors and the increase of stress-tolerators, the vegetation types were ranked as follows: forest (C: 47, S: 44), meadow (C: 47, S: 37), bush (C: 44, S: 46), mire (C: 42, S: 49) and mountain tundra (C: 35, S: 58). The different vegetation types showed different responses

to elevation changes in the CSR terms. Meadows, bushes and mountain tundra showed the most corresponding behavior with Grime's CSR theory predictions: a significant decrease of the C scores and an increase of S component (4–5% for every 100 m increase in elevation). Finally, forests and mires did not show notable changes in the CSR status.

Keywords: Grime's CSR, functional traits, altitude gradient, mountain vegetation.

Горные системы являются хорошими модельными объектами для оценки влияния различных экологических факторов на растительный покров. Даже небольшие по протяжённости горные территории обладают сложной топографией и существенными перепадами высот, что является причиной изменений основных экологических факторов, ограничивающих рост и выживание отдельных видов растений [1, 2]. Наличие большого числа разных по своей экологии местообитаний обуславливает высокое синтаксономическое разнообразие растительности горных систем [3, 4]. Основным фактором, оказывающим влияние на растительный покров в горах, является высота над уровнем моря. С высотой тесно связаны такие показатели как: среднегодовая температура, мощность почвенного покрова, сила ветра и многие другие экологические характеристики [4, 5]. Наличие чётко выраженных высотных градиентов позволяет моделировать изменения растительного покрова при различных сценариях климатических изменений.

При экологической оценке растительности часто, наряду с прямыми измерениями параметров среды, используются обобщённые группы (функциональные типы) растений, которые объединяют виды, реагирующие на изменения окружающей среды сходным образом [6–8]. Зачастую такой подход позволяет получать более полные и комплексные данные об экосистемных процессах по сравнению с результатами изучения видового разнообразия [9–13].

Одной из таких обобщённых групп, получивших широкое распространение в последнее время, является система жизненных стратегий видов – CSR-система [6, 8, 14]. Согласно ей выделяют три основных типа растений: конкуренты (С-виды), стресс-толеранты (S) и рудералы (R).

Установлено, что доминирование видов того или иного CSR-типа является чётким показателем состояния растительности на исследуемой территории, а изменение соотношения различных групп указывает на фундаментальные изменения, происходящие в экосистемах [15, 16].

Следуя общей логике CSR-классификации жизненных стратегий, можно предположить,

что в горах с увеличением высоты над уровнем моря и ухудшением экологических условий будет возрастать значение S-компоненты и снижаться вес С-видов [17–20]. Однако примеры исследований горной растительности с использованием CSR-подхода не всегда чётко подтверждают данную гипотезу. Например, показано [21–23], что в луговых сообществах южных регионов даже на больших высотах сохраняется преобладание С-видов. Реакция растительных сообществ на изменения экологических условий различна и зависит от множества факторов: рельефа, химического состава почв, гидрологии, наличия древесного яруса и его видового состава, обилия напочвенных мхов и т. п. [2, 24–26]. С учётом этого, наряду с выявлением общих закономерностей в изменении растительности на высотном градиенте, интерес представляет анализ отдельных типов сообществ, характерных для конкретного района исследований.

В нашем распоряжении имеется уникальный набор данных, собранных на территории Национального парка Югд-ва, расположенного в наиболее высокогорной части Уральских гор (Северный и Приполярный Урал). Здесь на относительно небольшой территории в системе высотной поясности наблюдаются принципиально разные по своему составу и структуре сообщества: от тёмнохвойных лесов и болот до горных тундр [27, 28].

Целью данной работы было изучить изменения CSR-статуса в разных типах растительности Северного и Приполярного Урала вдоль высотного градиента.

Объекты и методы исследования

В 2016–2019 гг. авторы провели в границах национального парка Югд-ва детальные исследования растительности. Модельные участки расположены на Приполярном (бассейн верхнего течения р. Вангыр, 64°58' с. ш., 59°13' в. д.) и Северном (хребет Тельпос-из, 63°48' с. ш., 59°16' в. д.) Урале. Растительность на исследуемой территории чётко дифференцирована по высотным поясам. Сообщества горно-лесного пояса встречаются на высотах до 600 м над уровнем моря. Подгольцовый пояс, в котором сочетаются горные редколе-

ся, луга и кустарниковая растительность, а в верхней части – фитоценозы горных тундр, расположен на высотах 500–700 м. Сообщества горных тундр становятся преобладающими на высотах 600–1100 м. На высотах более 1100 м наблюдается большая доля гольцов с доминированием низших споровых растений и каменных россыпей.

В обработку включено 275 геоботанических описаний, сделанных по общепринятым геоботаническим методам [29] на высотах 267–940 м над уровнем моря. Эти описания охватывают все основные типы растительности, представленные на данной территории: леса – 103 описания, луга – 30, сообщества кустарников – 41, болота – 41 и горные тундры – 60. Описания выполняли на пробных площадях (в лесах их размер составлял 400 м², лугах и кустарниковых растительных сообществах – 100 м², тундрах – 25 м²) или в естественных границах сообщества. В древесном ярусе по пологам описывали состав древостоя, фиксировали сомкнутость крон, высоту и диаметр стволов деревьев. Для подлеска, травяно-кустарничкового яруса и напочвенного покрова отмечали общее проективное покрытие по каждому из этих ярусов и обилие формирующих их видов. Латинские названия видов приведены согласно <http://www.worldfloraonline.org>.

В качестве интегральной характеристики сообщества (CSR-статус) использовали взвешенное среднее [30, 31] от CSR-координат видов, входящих в состав сообщества. В качестве весов использовали балл обилия вида. CSR-стратегии видов определяли согласно сводке [32], затем буквенные обозначения преобразовывали в числовые координаты согласно [8].

Сравнение обобщённых CSR-координат сообществ проводили при помощи дисперсионного анализа. Зависимость от высоты оценивали на основе обобщённых аддитивных моделей (GAM) [33]. В качестве зависимого фактора использовали по отдельности баллы по C, S и R осям, в качестве независимого фактора – высоту расположения растительных сообществ. Далее, методами линейного моделирования (LM) была проведена оценка взаимосвязи высоты и CSR-баллов для каждого выделенного типа растительности по отдельности. В качестве факторов использовали высоту и тип растительности.

Все вычисления и визуализацию проводили в статистической программе R 4.2.2 с установленными дополнительными пакетами «mgcv» [33] и «ggplot2» [34].

Результаты и обсуждение

По оси конкурентности (C) все исследованные описания лежат в диапазоне 15–70%; для оси стресс-толерантности (S) – 15–80%, для оси рудеральности (R) – 0–30%. Среднее значение по оси рудеральности всех описаний не превышает 10%. Таким образом, основные изменения CSR-координат находятся на оси CS. Между конкурентной и стресс-толерантной компонентами наблюдается наиболее чётко выраженная и статистически значимая обратно пропорциональная зависимость ($r = -0,87, p < 0,001$). Корреляция значений по рудеральной оси со значениями по стресс-толерантной заметно меньше ($r = -0,58, p < 0,001$), а по рудеральной оси с конкурентной – фактически равна нулю ($r = 0,01, p = 0,912$).

Использование метода смешанного линейного моделирования (GAM) показало неравномерность изменений CSR баллов в зависимости от высоты расположения описаний. Растительные сообщества, расположенные на более низких высотах (200–600 м), не показали чётко выраженной динамики в изменении средневзвешенных CSR-баллов. Уменьшение балла для оси конкурентности (C) и увеличение для оси стресс-толерантности (S) начинает проявляться на высотах 600 м над уровнем моря и выше. Для оси рудеральности чётко выраженных изменений не отмечено (рис. 1).

Выделенные типы растительности хорошо различаются по своему положению на треугольнике Дж. Грайма (рис. 2, см. цв. вкладку VII). Они образуют чётко выраженный и статистически значимый ряд: лесные сообщества – луга – кустарниковая растительность – болота – горные тундры. В этом ряду наблюдается уменьшение среднего балла конкурентности с одновременным увеличением балла стресс-толерантности (табл. 1). Ось рудеральности, в свою очередь, характеризуется минимальными значениями и отсутствием ярко выраженных трендов.

Проведённое двухфакторное линейное моделирование CSR-баллов геоботанических описаний показало статистически значимые различия сообществ разных типов в зависимости от высоты (рис. 3, см. цв. вкладку VII). Так, для сообществ лугов, кустарников и горных тундр наблюдается статистически значимое уменьшение балла конкурентности и увеличение балла стресс-толерантности на 4–6% на каждые 100 м высоты расположения сообществ. Для лесного и болотного типов значимых изменений

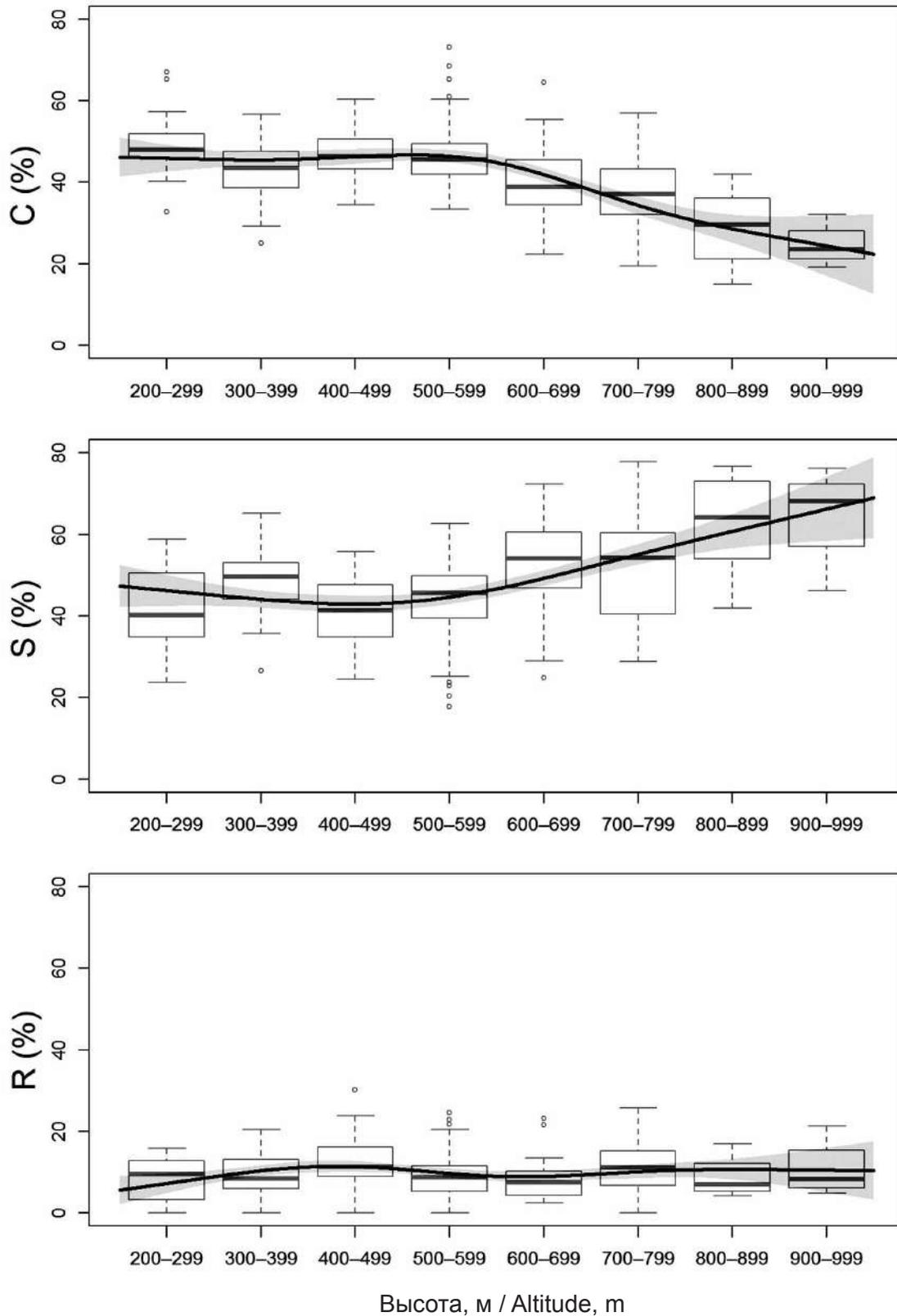


Рис. 1. Диаграмма изменений обобщённых CSR-баллов в зависимости от высоты. Линия тренда представлена в виде обобщённой аддитивной модели (GAM), серым цветом показана стандартная ошибка

Fig. 1. The relationship between the C (competitor), S (stress-tolerator), and R (ruderal) scores and altitude. The trend line is presented as a generalized additive model (GAM). The standard error is shown in gray

Таблица 1 / Table 1

CSR-показатели типов растительности / CSR status of the vegetation types

CSR-стратегия CSR scores	Средние значения ± SD Mean values ± SD					Результаты дисперсионного анализа ANOVA	
	лес forest	луг meadow	кустарниковая растительность bush	болота mire	горные тундры mountain tundra	F	p
C	47±6	47±9	44±12	42±6	35±9	23,6	< 0,001
S	44±7	37±10	46±14	49±7	58±9	31,9	
R	9±5	17±6	11±7	10±5	7±5	17,6	

Примечание: SD – стандартное отклонение, F – статистика дисперсионного анализа, p – уровень значимости.
Note: SD – standard deviation, F – value of F-test, p – corresponding p-value.

Таблица 2 / Table 2

Результаты двухфакторного линейного моделирования изменения C-, S- и R-баллов по отношению к высоте расположения сообществ / The results of linear regression of C (competitor), S (stress-tolerator), and R (ruderal) scores depending on the altitude of the plant communities

Тип растительности Vegetation type	C		S		R	
	коэффициент coefficient	p	коэффициент coefficient	p	коэффициент coefficient	p
Леса / Forest	0,01	0,048	-0,01	0,002	0,00	0,276
Луга / Meadow	-0,03	0,003	0,03	0,009	-0,00	0,736
Кустарниковая растительность Bush	-0,04	< 0,001	0,04	0,008	0,01	0,386
Болота / Mire	0,02	0,003	-0,01	0,149	-0,01	0,211
Горные тундры Mountain tundra	-0,05	< 0,001	0,04	< 0,001	0,01	0,132

Примечание: приведены только угловые коэффициенты моделей. Свободные члены линейных уравнений нами не использовались, поэтому они в таблице опущены. Жирным шрифтом выделены коэффициенты на уровне значимости p < 0,01.

Note: only the slope coefficients of the linear models are presented. We did not use intercepts; therefore, they are omitted from the table. Significant coefficients (p < 0.01) are bold.

в CSR-координатах в зависимости от высоты не обнаружено (табл. 2). По оси рудеральности значимых изменений ни для одного типа растительности не отмечено.

При изучении растительного покрова горных территорий общепринятой является гипотеза об увеличении доли стресс-толерантных видов с высотой расположения сообществ вследствие ухудшения условий окружающей среды [17, 18, 21, 22]. Автор концепции жизненных стратегий Дж. Грайм также рассматривал альпийские виды как типичные стресс-толеранты [35]. Результаты наших исследований в целом подтверждают эту гипотезу. Однако следует отметить, что наблюдаемые изменения растительности носят нелинейный характер (рис. 1). На высотах 200–600 м над уровнем моря обобщённые CSR-координаты практически не меняются и остаются на одном уровне (C – 50–55%, S – 40–45%, R – 5–10%).

На отметках абсолютных высот более 600 м наблюдается постепенное уменьшение балла конкурентности до 25–30% и увеличение балла стресс-толерантности до 60–70%.

R-компонента на градиенте высоты остаётся практически неизменной. Её небольшая доля свидетельствует об отсутствии антропогенного воздействия на растительность, что было ожидаемо для столь удалённого района, более 25 лет имеющего статус особо охраняемой природной территории.

На наш взгляд, наблюдаемое изменение соотношения долей C- и S-видов на отметках абсолютных высот порядка 600 м над уровнем моря связано с тем, что именно на них в районе исследований проходит граница распространения лесов и редколесий [36]. Выше встречаются только отдельные деревья, которые не оказывают существенного влияния на кустарниковый, травяно-кустарниковый ярусы

и напочвенный покров фитоценозов. На этих же высотах появляются сообщества горных тундр, для которых типичны стресс-толерантные виды. При дальнейшем увеличении высоты доля горно-тундровых сообществ в растительном покрове увеличивается, а доля сообществ остальных типов растительности снижается. Всё это закономерно влияет на обобщённые CSR-координаты.

Сравнение выделенных типов растительности показывает значимые различия по их положению в С-, S- и R-осях треугольника Грайма (табл. 1). Горно-тундровые сообщества, расположенные наиболее высоко над уровнем моря, показали максимальные баллы по оси стресс-толерантности. С увеличением высоты расположения наблюдается резкое ухудшение экологических условий: снижается температура и мощность почвенного покрова, увеличивается скорость ветра [37]. В таких местообитаниях наибольшее обилие демонстрируют типичные стресс-толеранты: *Avenella flexuosa* (S/CS), *Festuca ovina* (S), *Empetrum hermaphroditum* (CS), *Vaccinium vitis-idaea* (S/CS), *Hieracium alpinum* (S/CSR).

Для других типов растительности, расположенных на меньших отметках абсолютных высот, не выявлено однозначной связи CSR-координат с высотой. Например, сообщества горных лугов, занимающие второе место на градиенте высоты после горных тундр (табл. 1), характеризуются достаточно большой долей конкурентных видов: *Anthriscus sylvestris* (C/CR), *Filipendula ulmaria* (C/CS), *Sanguisorba officinalis* (C/CSR), *Thalictrum minus* (S/CSR), *Valeriana wolgensis* (CSR) и, как следствие, относительно высокими баллами по оси конкурентности. Горные луга являются интразональным элементом растительного покрова, занимают экотопы с богатыми почвами в местах стока водотоков на высотах вплоть до 800–900 м над уровнем моря и характеризуются относительно постоянным видовым составом с преобладанием С-видов [38]. Таким образом, влияние высоты расположения на функциональное разнообразие лугов в горах оказывается меньше, чем влияние фактора местообитания или фактора почвенного азота и фосфора. Аналогичные результаты получены при исследованиях луговых сообществ других горных систем, например, Кавказа [23].

Наибольшие значения усреднённого балла по шкале конкурентности характерны для лесных сообществ, которые расположены в средних диапазонах высот 400–600 м над уровнем моря. В этих сообществах отмечено

большое число высоко обильных видов с выраженной С-стратегией: *Angelica sylvestris* (C/CR), *Chamaenerion angustifolium* (C), *Calamagrostis purpurea* (C/CS). Исходя из общих представлений, логично предположить, что в лесных сообществах под сомкнутым древесным пологом в условиях недостатка света должны преобладать виды с выраженной S-компонентой. Однако в горных лесах Урала, по нашим данным, ярко выраженные С-виды часто являются доминантами нижних ярусов растительности, а лесные сообщества насаждений травяного типа занимают большие площади на склонах и в долинах рек [36]. Типичные для равнинной части таёжной зоны кустарничково-зеленомошные сообщества занимают в горах небольшие площади, не оказывая сильного влияния на общий CSR-статус лесного типа растительности.

Сообщества болотных экосистем, которые расположены на минимальных отметках абсолютных высот (300–500 м), имеют в своём составе большую долю стресс-толерантных видов (*Andromeda polifolia* (S/CS), *Carex rostrata* (CS), *Eriophorum vaginatum* (S/CS), *Oxycoccus palustris* (S/SR)). Соответственно, их обобщённые CSR-координаты имеют высокие значения по S-оси, и близки к показателям для горных тундр (рис. 2, см. цв. вкладку VII). Однако в отличие от горных тундр, болота не демонстрируют зависимость от фактора высоты расположения сообществ. В сильно обводнённых болотных экосистемах ведущим фактором, определяющим особенности функционального разнообразия растительных сообществ и доминирование S-видов в растительном покрове, является уровень увлажнения.

Интерес представляет изменчивость CSR-статусов геоботанических описаний внутри выделенных типов растительности. Оказалось, что разные типы растительности показывают неодинаковое отношение к изменению высоты. Для двух из них (леса и болота) значимых изменений не отмечено. Горные тундры, луга и сообщества кустарников показали статистически значимое уменьшение С и увеличение CSR-баллов с высотой (табл. 2; рис. 3, см. цв. вкладку VII). Скорость этих изменений приблизительно одинакова и составляет около 4–5% по С- и S-осям на каждые 100 м увеличения высоты (табл. 2). Такие изменения соответствуют общей гипотезе изменений CSR-статуса растительности на высотном градиенте. С увеличением высоты, экологические условия местообитаний ухудшаются, что приводит к усилению S-компоненты [35, 39].

А. Б. Новаковский, Ю. А. Дубровский, Е. Е. Кулюгина, С. В. Дёгтева
«Изменения функционального статуса
растительных сообществ вдоль высотного градиента
на Северном и Приполярном Урале». С. 160.

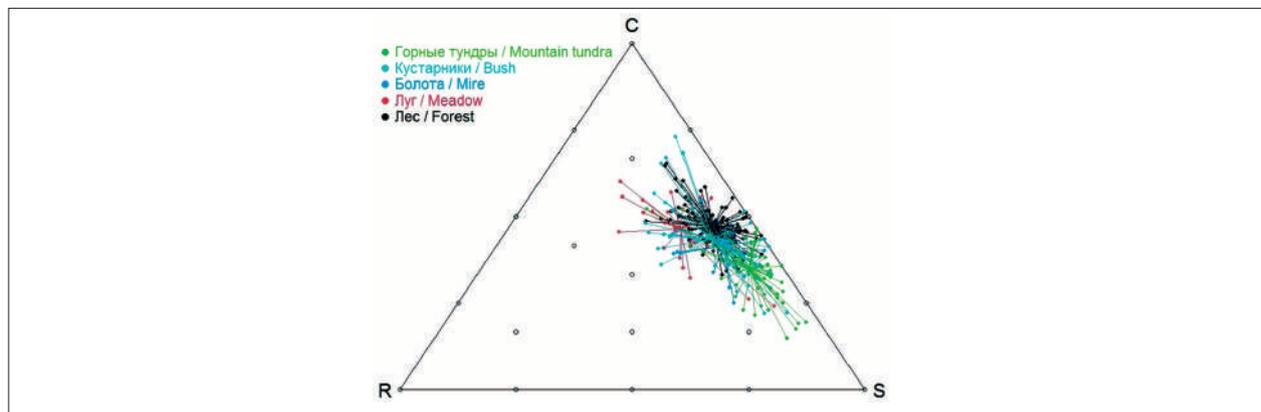


Рис. 2. Расположение исследованных растительных сообществ на CSR-треугольнике Дж. Грайма: C – конкуренты, S – стресс-толеранты, R – рудералы
Fig. 2 Position of the relevés of the five different vegetation types within Grime's CSR triangle: C – competitors, S – stress-tolerators, and R – ruderals

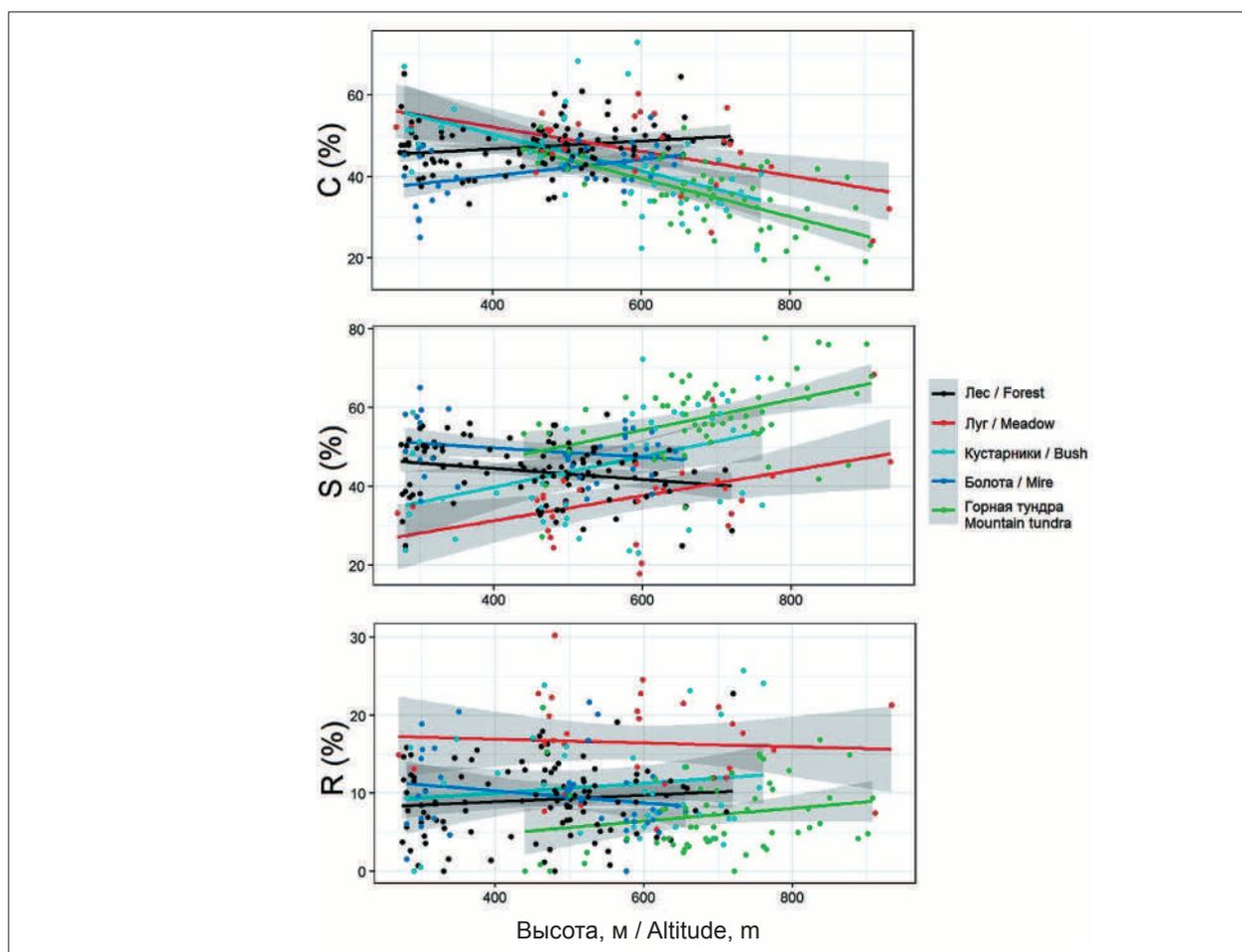


Рис. 3. Линейная регрессия между высотой и C (конкуренты), S (стресс-толеранты), R (рудералы) баллами растительных сообществ разных типов, выраженных в процентах
Fig. 3. Linear regression between the plant community scores for C (competitor), S (stress-tolerator), and R (ruderal) and altitude

Отсутствие значимых высотных изменений CSR-статуса для лесных сообществ может быть связано с особенностями кустарничково-травяного яруса горных лесов Урала. Ранее было показано [40, 41], что лесные сообщества на Урале характеризуются наличием устойчивого «ценотического» ядра видов, большая часть из которых относится к С-видам, которые сохраняют свои позиции в сообществах даже при таких сильных нарушениях растительного покрова, как пожары. Наличие сомкнутого древесного полога формирует в лесных сообществах особые, более однородные экологические условия по сравнению с лугами, кустарниками и горными тундрами. В лесу меньше воздействие ветра, более однороден почвенный состав, изменения светового режима также сглажены. Таким образом, растительность нижних полог лесов оказывается в более однородных экологических условиях на всём высотном градиенте до тех высот, пока снижение температур не становится лимитирующим фактором для роста деревьев.

Болота, по сравнению с остальными типами растительности, характеризуются экстремальным переувлажнением и крайне бедным содержанием минеральных веществ. Это способствует формированию специфических по составу и структуре растительных сообществ [28]. В таких условиях влияние высоты расположения на функциональные характеристики сообщества минимизируется. Определяющую роль играет степень обводнённости конкретного местообитания [42]. Ещё одним фактором, возможно нивелирующим изменчивость CSR-статуса болотных сообществ, является небольшой высотный диапазон (300–500 м над ур. м.), на котором находились описания болот, вошедшие в анализируемую выборку. Таким образом, учитывая их специфику, горные болота Урала требуют дальнейшего изучения, возможно с привлечением большего объёма материала и с охватом большей территории.

Заключение

В целом, растительные сообщества Приполярного и Северного Урала характеризуются преобладанием растений со стресс-толерантной жизненной стратегией. С высотой средний балл по оси S увеличивается с 40–50 до 60–70%. Обратная зависимость показана для балла по шкале конкурентности. С высотой его значения уменьшаются от 50–55 до 25–30%. Количество видов рудеральной группы невелико и средний балл по R-шкале не превышает

15%, что говорит об отсутствии антропогенного воздействия на исследуемую территорию.

Изменения CSR-координат носят нелинейный характер и начинаются на высотах 600 м над уровнем моря, где проходит верхняя граница распространения горных редколесий и наблюдается граница подгольцового и горно-тундрового поясов.

Разные типы растительности характеризуются значимыми различиями по своим CSR-координатам. По уменьшению доли конкурентных видов и пропорциональному увеличению доли стресс-толерантов сообщества выстроились в ряд: лесные сообщества (С: 47, S: 44), луговые (С: 47, S: 37), кустарниковые (С: 44, S: 46), болота (С: 42, S: 49) и горные тундры (С: 35, S: 58). R-компонента всех сообществ была небольшой и не показала чётко выраженной динамики на высотном градиенте.

Анализ средневзвешенных CSR-баллов для разных типов растительности позволил выделить два типа растительности (лесной и болотный), для CSR-структуры которых высота над уровнем моря не является определяющим фактором. Остальные типы растительности (луга, заросли кустарников и горные тундры) демонстрируют сопоставимые изменения: уменьшение балла конкурентности и увеличение балла стресс-толерантности на 4–6% на каждые 100 м высоты над уровнем моря.

Исследование проведено в рамках бюджетной темы «Оценка эколого-ценотического, видового и популяционного разнообразия растительного мира ключевых особо охраняемых природных территорий Республики Коми» (регистрационный номер: 122040600026-9).

Литература

1. Pauli H., Gottfried M., Reiter K., Klettner C., Grabherr G. Signals of range expansions and contractions of vascular plants in the high Alps: observations (1994–2004) at the GLORIA* master site Schrankogel, Tyrol, Austria // *Global Change Biology*. 2007. V. 13. No. 1. P. 147–156.
2. Amagai Y., Kudo G., Sato K. Changes in alpine plant communities under climate change: Dynamics of snow-meadow vegetation in northern Japan over the last 40 years // *Applied Vegetation Science*. 2018. V. 21. No. 4. P. 561–571.
3. Winkler M., Lamprecht A., Steinbauer K., Hülber K., Theurillat J.-P., Breiner F., Choler P., Ertl S., Girón A.G., Rossi G., Vittoz P., Akhalkatsi M., Bay C., Alonso J.-L.B., Bergström T., Carranza M.L., Corcket E., Dick J., Erschbamer B., Calzado R.F., Fosaa A.M., Gavilán R.G., Ghosn D.,

- Gigauri K., Huber D., Kanka R., Kazakis G., Klipp M., Kollar J., Kudernatsch T., Larsson P., Mallaun M., Michelsen O., Moiseev P., Moiseev D., Molau U., Mesa J.M., Cella U.M., Nagy L., Petey M., Puscas M., Rixen C., Stanisci A., Suen M., Syverhuset A.O., Tomaselli M., Unterluggauer P., Ursu T., Villar L., Gottfried M., Pauli H. The rich sides of mountain summits – a pan-European view on aspect preferences of alpine plants // *Journal of Biogeography*. 2016. V. 43. No. 11. P. 2261–2273.
4. Rogora M., Frate L., Carranza M.L., Freppaz M., Stanisci A., Bertani I., Bottarin R., Brambilla A., Canullo R., Carbognani M., Cerrato C., Chelli S., Cremonese E., Cutini M., Di Musciano M., Erschbamer B., Godone D., Iocchi M., Isabella M., Magnani A., Mazzola L., Morra di Cella U., Pauli H., Petey M., Petriccione B., Porro F., Psenner R., Rossetti G., Scotti A., Sommaruga R., Tappeiner U., Theurillat J.-P., Tomaselli M., Viglietti D., Viterbi R., Vittoz P., Winkler M., Matteucci G. Assessment of climate change effects on mountain ecosystems through a cross-site analysis in the Alps and Apennines // *Science of the Total Environment*. 2018. V. 624. P. 1429–1442.
5. Whiteman C.D. *Mountain meteorology: fundamentals and applications*. Oxford University Press, 2000. 376 p.
6. Grime J.P., Hodgson J.G., Hunt R. *Comparative plant ecology: a functional approach to common British species*. London: Unwin Hyman, 1988. 772 p.
7. Reich P.B. The world-wide ‘fast–slow’ plant economics spectrum: a traits manifesto // *Journal of Ecology*. 2014. V. 102. No. 2. P. 275–301.
8. Pierce S., Negreiros D., Cerabolini B.E.L., Kattge J., Diaz S., Kleyer M., Shipley B., Wright S.J., Soudzilovskaia N.A., Onipchenko V.G., Bodegom P.M. van Frenette-Dussault C., Weiher E., Pinho B.X., Cornelissen J.H.C., Grime J.P., Thompson K., Hunt R., Wilson P.J., Buffa G., Nyakunga O.C., Reich P.B., Caccianiga M., Mangili F., Ceriani R.M., Luzzaro A., Brusa G., Siefert A., Barbosa N.P.U., Chapin F.S., Cornwell W.K., Fang J., Fernandes G.W., Garnier E., Stradić S.L., Peñuelas J., Melo F.P.L., Slaviero A., Tabarelli M., Tampucci D. A global method for calculating plant CSR ecological strategies applied across biomes world-wide // *Funct Ecol*. 2017. V. 31. No. 2. P. 444–457.
9. Diaz S., Cabido M. Vive la différence: plant functional diversity matters to ecosystem processes // *Trends in Ecology & Evolution*. 2001. V. 16. No. 11. P. 646–655.
10. Cerabolini B., Pierce S., Luzzaro A., Ossola A. Species evenness affects ecosystem processes in situ via diversity in the adaptive strategies of dominant species // *Plant Ecology*. 2010. V. 207. No. 2. P. 333–345.
11. Cadotte M.W., Carscadden K., Mirotchnick N. Beyond species: functional diversity and the maintenance of ecological processes and services // *Journal of Applied Ecology*. 2011. V. 48. No. 5. P. 1079–1087.
12. Новаковский А.Б., Панюков А.Н. Анализ сукцессионной динамики сеяного луга при помощи системы жизненных стратегий Раменского-Грайма // *Экология*. 2018. № 2. С. 110–118.
13. Novakovskiy A.B., Kanev V.A., Markarova M.Y. Long-term dynamics of plant communities after biological remediation of oil-contaminated soils in far north // *Scientific Reports*. 2021. V. 11. Article No. 4888.
14. Раменский Л.Г. О принципиальных установках, основных понятиях и терминах производственной типологии земель, геоботаники и экологии // *Советская ботаника*. 1935. № 4. С. 25–42.
15. Stevens C.J., Thompson K., Grime J.P., Long C.J., Gowing D.J.G. Contribution of acidification and eutrophication to declines in species richness of calcifuge grasslands along a gradient of atmospheric nitrogen deposition // *Functional Ecology*. 2010. V. 24. No. 2. P. 478–484.
16. Prévosto B., Kuiters L., Bernhardt-Römermann M., Dölle M., Schmidt W., Hoffmann M., Van Uytvanck J., Bohner A., Kreiner D., Stadler J., Klotz S., Brandl R. Impacts of land abandonment on vegetation: Successional pathways in European habitats // *Folia Geobot*. 2011. V. 46. No. 4. P. 303–325.
17. Caccianiga M., Luzzaro A., Pierce S., Ceriani R.M., Cerabolini B. The functional basis of a primary succession resolved by CSR classification // *Oikos*. 2006. V. 112. No. 1. P. 10–20.
18. Ferré C., Caccianiga M., Zanzottera M., Comolli R. Soil-plant interactions in a pasture of the Italian Alps // *Journal of Plant Interactions*. 2020. V. 15. No. 1. P. 39–49.
19. Barba-Escoto L., Ponce-Mendoza A., García-Romero A., Calvillo-Medina R.P. Plant community strategies responses to recent eruptions of Popocatepetl volcano, Mexico // *Journal of Vegetation Science*. 2019. V. 30. No. 2. P. 375–385.
20. Zanzottera M., Dalle Fratte M., Caccianiga M., Pierce S., Cerabolini B.E.L. Community-level variation in plant functional traits and ecological strategies shapes habitat structure along succession gradients in alpine environment // *Community Ecology*. 2020. V. 21. No. 1. P. 55–65.
21. Huseyinoglu R., Yalcin E. Competitive, stress-tolerant and ruderal based classification of some plant species in an Alpine community of the Giresun Mountains in Turkey // *Journal of Environmental Biology*. 2017. V. 38. No. 5. P. 761–769.
22. Wang J., Zhang C., Yang H., Mou C., Mo L., Luo P. Plant community ecological strategy assembly response to yak grazing in an alpine meadow on the eastern Tibetan Plateau // *Land Degrad. Dev*. 2018. V. 29. No. 9. P. 2920–2931.
23. Дудова К.В., Джатдоева Т.М., Дудов С.В., Ахметжанова А.А., Текеев Д.К., Онищенко В.Г. Конкурентная стратегия растений субальпийского высокоотравья Северо-Западного Кавказа // *Вестник Московского университета. Серия 16: Биология*. 2019. Т. 74. № 3. С. 179–187.
24. Spasojevic M.J., Bowman W.D., Humphries H.C., Seastedt T.R., Suding K.N. Changes in alpine vegetation over 21 years: Are patterns across a heterogeneous land-

scape consistent with predictions? // *Ecosphere*. 2013. V. 4. No. 9. P. 1–18.

25. Venn S., Pickering C., Green K. Spatial and temporal functional changes in alpine summit vegetation are driven by increases in shrubs and graminoids // *AoB PLANTS*. 2014. V. 6. Article No. plu008.

26. Wookey P.A., Aerts R., Bardgett R.D., Baptist F., Brathen K.A., Cornelissen J.H.C., Gough L., Hartley I.P., Hopkins D.W., Lavorel S., Shaver G.R. Ecosystem feedbacks and cascade processes: understanding their role in the responses of Arctic and alpine ecosystems to environmental change // *Glob. Change Biol.* 2009. V. 15. No. 5. P. 1153–1172.

27. Novakovskaya I.V., Dubrovskiy Yu.A., Patova E.N., Novakovskiy A.B., Sterlyagova I.N. Influence of ecological factors on soil algae in different types of mountain tundra and sparse forests in the Northern Urals // *Phycologia*. 2020. V. 59. No. 4. P. 320–329.

28. Sizonenko T.A., Dubrovskiy Yu.A., Novakovskiy A.B. Changes in mycorrhizal status and type in plant communities along altitudinal and ecological gradients – a case study from the Northern Urals (Russia) // *Mycorrhiza*. 2020. V. 30. No. 4. P. 445–454.

29. Ипатов В.С., Мирин Д.М. Описание фитоценоза. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет, 2008. 70 с.

30. Garnier E., Cortez J., Billès G., Navas M.-L., Roumet C., Debussche M., Laurent G., Blanchard A., Aubry D., Bellmann A., Neill C., Toussaint J.-P. Plant functional markers capture ecosystem properties during secondary succession // *Ecology*. 2004. V. 85. No. 9. P. 2630–2637.

31. Lavorel S., Grigulis K., McIntyre S., Williams N.S.G., Garden D., Dorrough J., Berman S., Quétier F., Thébault A., Bonis A. Assessing functional diversity in the field – methodology matters! // *Functional Ecology*. 2008. V. 22. No. 1. P. 134–147.

32. Hunt R., Hodgson J.G., Thompson K., Bungener P., Dunnett N.P., Askew A.P. A new practical tool for deriving a functional signature for herbaceous vegetation // *Applied Vegetation Science*. 2004. V. 7. No. 2. P. 163–170.

33. Wood S.N. Generalized additive models: An introduction with R, second edition. Boca Raton: CRC press, 2017. 496 p.

34. Wickham H. *Ggplot2: elegant graphics for data analysis*. New York: Springer-Verlag, 2016. 260 p.

35. Grime J.P. Evidence for the existence of three primary strategies in plants and its relevance to ecological and evolutionary theory // *The American Naturalist*. 1977. V. 111. No. 982. P. 1169–1194.

36. Дубровский Ю.А., Жангуров Е.В., Старцев В.В., Семенова Н.А., Сизоненко Т.А. Хвойные леса южной части национального парка «Югыд ва» (Республика Коми, бассейны рек Щугор и Подчерем) // *Труды Карельского научного центра Российской академии наук*. 2019. № 1. С. 22–43.

37. Думов А.А., Zhangurov E.V., Hagedorn F. Soil organic matter composition along altitudinal gradients in permafrost affected soils of the Subpolar Ural Mountains // *CATENA*. 2015. V. 131. P. 140–148.

38. Дёгтева С.В., Дубровский Ю.А. Ценотическое разнообразие растительности горно-тундрового и подгольцового поясов хребта Маньпупунёр (Северный Урал, Печоро-Ильчский заповедник) // *Растительность России*. 2018. № 34. С. 47–84.

39. Pierce S., Luzzaro A., Caccianiga M., Ceriani R.M., Cerabolini B. Disturbance is the principal α -scale filter determining niche differentiation, coexistence and biodiversity in an alpine community // *Journal of Ecology*. 2007. V. 95. No. 4. P. 698–706.

40. Дёгтева С.В., Дубровский Ю.А. Лесная растительность бассейна р. Ильч в границах Печоро-Ильчского заповедника. СПб.: Наука, 2014. 291 с.

41. Дёгтева С.В., Кулюгина Е.Е., Дубровский Ю.А., Новаковский А.Б. Сравнительный анализ ценофлор горных тундр западного макросклона северного и приполярного Урала // *Теоретическая и прикладная экология*. 2014. № 1. С. 16–21.

42. Новаковский А.Б., Дёгтева С.В. Эколого-ценотические группы видов в фитоценозах ландшафтов Северного и Приполярного Урала и Приуралья // *Теоретическая и прикладная экология*. 2008. № 1. С. 32–37.

References

1. Pauli H., Gottfried M., Reiter K., Klettner C., Grabherr G. Signals of range expansions and contractions of vascular plants in the high Alps: observations (1994–2004) at the GLORIA* master site Schrankogel, Tyrol, Austria // *Global Change Biology*. 2007. V. 13. No. 1. P. 147–156. doi: 10.1111/j.1365-2486.2006.01282.x

2. Amagai Y., Kudo G., Sato K. Changes in alpine plant communities under climate change: Dynamics of snow-meadow vegetation in northern Japan over the last 40 years // *Applied Vegetation Science*. 2018. V. 21. No. 4. P. 561–571. doi: 10.1111/avsc.12387

3. Winkler M., Lamprecht A., Steinbauer K., Hülber K., Theurillat J.-P., Breiner F., Choler P., Ertl S., Girón A.G., Rossi G., Vittoz P., Akhalkatsi M., Bay C., Alonso J.-L.B., Bergström T., Carranza M.L., Corcket E., Dick J., Erschbamer B., Calzado R.F., Fosaa A.M., Gavilán R.G., Ghosn D., Gigauri K., Huber D., Kanka R., Kazakis G., Klipp M., Kollar J., Kudernatsch T., Larsson P., Mallaun M., Michelsen O., Moiseev P., Moiseev D., Molau U., Mesa J.M., Cella U.M., Nagy L., Petey M., Puscas M., Rixen C., Stanisci A., Suen M., Syverhuset A.O., Tomaselli M., Unterluggauer P., Ursu T., Villar L., Gottfried M., Pauli H. The rich sides of mountain summits – a pan-European view on aspect preferences of alpine plants // *Journal of Biogeography*. 2016. V. 43. No. 11. P. 2261–2273. doi: 10.1111/jbi.12835

4. Rogora M., Frate L., Carranza M.L., Freppaz M., Stanisci A., Bertani I., Bottarin R., Brambilla A., Canullo R.,

- Carbognani M., Cerrato C., Chelli S., Cremonese E., Cutini M., Di Musciano M., Erschbamer B., Godone D., Iocchi M., Isabellon M., Magnani A., Mazzola L., Morra di Cella U., Pauli H., Petey M., Petriccione B., Porro F., Psenner R., Rossetti G., Scotti A., Sommaruga R., Tappeiner U., Theurillat J.-P., Tomaselli M., Viglietti D., Viterbi R., Vittoz P., Winkler M., Matteucci G. Assessment of climate change effects on mountain ecosystems through a cross-site analysis in the Alps and Apennines // *Science of the Total Environment*. 2018. V. 624. P. 1429–1442. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.12.155
5. Whiteman C.D. *Mountain meteorology: fundamentals and applications*. Oxford University Press, 2000. 376 p.
 6. Grime J.P., Hodgson J.G., Hunt R. *Comparative plant ecology: a functional approach to common British species*. London: Unwin Hyman, 1988. 772 p.
 7. Reich P.B. The world-wide “fast–slow” plant economics spectrum: a traits manifesto // *Journal of Ecology*. 2014. V. 102. No. 2. P. 275–301. doi: 10.1111/1365-2745.12211
 8. Pierce S., Negreiros D., Cerabolini B.E.L., Kattge J., Diaz S., Kleyer M., Shipley B., Wright S.J., Soudzilovskaia N.A., Onipchenko V.G., Bodegom P.M., van Frenette-Dussault C., Weiher E., Pinho B.X., Cornelissen J.H.C., Grime J.P., Thompson K., Hunt R., Wilson P.J., Buffa G., Nyakunga O.C., Reich P.B., Caccianiga M., Mangili F., Ceriani R.M., Luzzaro A., Brusa G., Siefert A., Barbosa N.P.U., Chapin F.S., Cornwell W.K., Fang J., Fernandes G.W., Garnier E., Stradic S.L., Peñuelas J., Melo F.P.L., Slaviero A., Tabarelli M., Tampucci D. A global method for calculating plant CSR ecological strategies applied across biomes world-wide // *Funct Ecol*. 2017. V. 31. No. 2. P. 444–457. doi: 10.1111/1365-2435.12722
 9. Díaz S., Cabido M. Vive la différence: plant functional diversity matters to ecosystem processes // *Trends in Ecology & Evolution*. 2001. V. 16. No. 11. P. 646–655. doi: 10.1016/S0169-5347(01)02283-2
 10. Cerabolini B., Pierce S., Luzzaro A., Ossola A. Species evenness affects ecosystem processes in situ via diversity in the adaptive strategies of dominant species // *Plant Ecology*. 2010. V. 207. No. 2. P. 333–345. doi: 10.1007/s11258-009-9677-1
 11. Cadotte M.W., Carscadden K., Mirotchnick N. Beyond species: functional diversity and the maintenance of ecological processes and services // *Journal of Applied Ecology*. 2011. V. 48. No. 5. P. 1079–1087. doi: 10.1111/j.1365-2664.2011.02048.x
 12. Novakovskiy A.B., Panyukov A.N. Analysis of successional dynamics of a sown meadow using Ramenskii-Grime’s system of ecological strategies // *Russ J Ecol*. 2018. V. 49. P. 119–127. doi: 10.1134/S106741361802011X
 13. Novakovskiy A.B., Kanev V.A., Markarova M.Y. Long-term dynamics of plant communities after biological remediation of oil-contaminated soils in far north // *Scientific Reports*. 2021. V. 11. Article No. 4888. doi: 10.1038/s41598-021-84226-5
 14. Ramenskiy L.G. On the fundamental principles, basic concepts and terms of the production typology of lands, geobotany and ecology // *Sovetskaya botanika*. 1935. No. 4. P. 25–42 (in Russian).
 15. Stevens C.J., Thompson K., Grime J.P., Long C.J., Gowing D.J.G. Contribution of acidification and eutrophication to declines in species richness of calcifuge grasslands along a gradient of atmospheric nitrogen deposition // *Functional Ecology*. 2010. V. 24. No. 2. P. 478–484. doi: 10.1111/j.1365-2435.2009.01663.x
 16. Prévosto B., Kuiters L., Bernhardt-Römermann M., Dölle M., Schmidt W., Hoffmann M., Van Uytvanck J., Bohner A., Kreiner D., Stadler J., Klotz S., Brandl R. Impacts of land abandonment on vegetation: Successional pathways in European habitats // *Folia Geobot*. 2011. V. 46. No. 4. P. 303–325. doi: 10.1007/s12224-010-9096-z
 17. Caccianiga M., Luzzaro A., Pierce S., Ceriani R.M., Cerabolini B. The functional basis of a primary succession resolved by CSR classification // *Oikos*. 2006. V. 112. No. 1. P. 10–20. doi: 10.1111/j.0030-1299.2006.14107.x
 18. Ferré C., Caccianiga M., Zanzottera M., Comolli R. Soil–plant interactions in a pasture of the Italian Alps // *Journal of Plant Interactions*. 2020. V. 15. No. 1. P. 39–49. doi: 10.1080/17429145.2020.1738570
 19. Barba-Escoto L., Ponce-Mendoza A., García-Romero A., Calvillo-Medina R.P. Plant community strategies responses to recent eruptions of Popocatepetl volcano, Mexico // *Journal of Vegetation Science*. 2019. V. 30. No. 2. P. 375–385. doi: 10.1111/jvs.12732
 20. Zanzottera M., Dalle Fratte M., Caccianiga M., Pierce S., Cerabolini B.E.L. Community-level variation in plant functional traits and ecological strategies shapes habitat structure along succession gradients in alpine environment // *Community Ecology*. 2020. V. 21. No. 1. P. 55–65. doi: 10.1007/s42974-020-00012-9
 21. Huseyinoglu R., Yalcin E. Competitive, stress-tolerant and ruderal based classification of some plant species in an Alpine community of the Giresun Mountains in Turkey // *Journal of Environmental Biology*. 2017. V. 38. No. 5. P. 761–769. doi: 10.22438/jeb/38/5/MRN-302
 22. Wang J., Zhang C., Yang H., Mou C., Mo L., Luo P. Plant community ecological strategy assembly response to yak grazing in an alpine meadow on the eastern Tibetan Plateau // *Land Degrad. Dev*. 2018. V. 29. No. 9. P. 2920–2931. doi: 10.1002/ldr.3050
 23. Dudova K.V., Dzhatdoeva T.M., Dudov S.V., Akhmetzhanova A.A., Tekeev D.K., Onipchenko V.G. Competitive strategy of Subalpine tall-grass species of the Northwestern Caucasus // *Moscow Univ. Biol. Sci. Bull*. 2019. V. 74. P. 140–146. doi: 10.3103/S0096392519030039
 24. Spasojevic M.J., Bowman W.D., Humphries H.C., Seastedt T.R., Suding K.N. Changes in alpine vegetation over 21 years: Are patterns across a heterogeneous landscape consistent with predictions? // *Ecosphere*. 2013. V. 44. No. 9. P. 1–18. doi: 10.1890/ES13-00133.1

25. Venn S., Pickering C., Green K. Spatial and temporal functional changes in alpine summit vegetation are driven by increases in shrubs and graminoids // *AoB PLANTS*. 2014. V. 6. Article No. plu008. doi: 10.1093/aobpla/plu008
26. Wookey P.A., Aerts R., Bardgett R.D., Baptist F., Brathen K.A., Cornelissen J.H.C., Gough L., Hartley I.P., Hopkins D.W., Lavorel S., Shaver G.R. Ecosystem feedbacks and cascade processes: understanding their role in the responses of Arctic and alpine ecosystems to environmental change // *Glob. Change Biol.* 2009. V. 15. No. 5. P. 1153–1172. doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01801.x
27. Novakovskaya I.V., Dubrovskiy Yu.A., Patova E.N., Novakovskiy A.B., Sterlyagova I.N. Influence of ecological factors on soil algae in different types of mountain tundra and sparse forests in the Northern Urals // *Phycologia*. 2020. V. 59. No. 4. P. 320–329. doi: 10.1080/00318884.2020.1754736
28. Sizonenko T.A., Dubrovskiy Yu.A., Novakovskiy A.B. Changes in mycorrhizal status and type in plant communities along altitudinal and ecological gradients – a case study from the Northern Urals (Russia) // *Mycorrhiza*. 2020. V. 30. No. 4. P. 445–454. doi: 10.1007/s00572-020-00961-z
29. Ipatov V.S., Mirin D.M. Description of phythocenosis. methodical recommendations. Sankt-Peterburg: St. Petersburg State University press, 2008. 70 p. (in Russian).
30. Garnier E., Cortez J., Billès G., Navas M.-L., Roumet C., Debussche M., Laurent G., Blanchard A., Aubry D., Bellmann A., Neill C., Toussaint J.-P. Plant functional markers capture ecosystem properties during secondary succession // *Ecology*. 2004. V. 85. No. 9. P. 2630–2637. doi: 10.1890/03-0799
31. Lavorel S., Grigulis K., McIntyre S., Williams N.S.G., Garden D., Dorrough J., Berman S., Quétier F., Thébault A., Bonis A. Assessing functional diversity in the field – methodology matters! // *Functional Ecology*. 2008. V. 22. No. 1. P. 134–147. doi: 10.1111/j.1365-2435.2007.01339.x
32. Hunt R., Hodgson J.G., Thompson K., Bungener P., Dunnett N.P., Askew A.P. A new practical tool for deriving a functional signature for herbaceous vegetation // *Applied Vegetation Science*. 2004. V. 7. No. 2. P. 163–170. doi: 10.1111/j.1654-109X.2004.tb00607.x
33. Wood S.N. Generalized additive models: An introduction with R, second edition. Boca Raton: CRC press, 2017. 496 p. doi: 10.1201/9781315370279
34. Wickham H. *Ggplot2: elegant graphics for data analysis*. New York: Springer-Verlag, 2016. 260 p. doi: 10.1007/978-0-387-98141-3
35. Grime J.P. Evidence for the existence of three primary strategies in plants and its relevance to ecological and evolutionary theory // *The American Naturalist*. 1977. V. 111. No. 982. P. 1169–1194.
36. Dubrovskiy Yu.A., Zhangurov E.V., Startsev V.V., Semenova N.A., Sizonenko T.A. Coniferous forests of the southern part of Yugyd Va national park (Komi Republic, Schugor and Podcherem river basins) // *Transactions of Karelian Research Centre of Russian Academy of Science. Biogeography*. 2019. V. 1. P. 22–43 (in Russian). doi: 10.17076/bg883
37. Dymov A.A., Zhangurov E.V., Hagedorn F. Soil organic matter composition along altitudinal gradients in permafrost affected soils of the Subpolar Ural Mountains // *CATENA*. 2015. V. 131. P. 140–148. doi: 10.1016/j.catena.2015.03.020
38. Degteva S.V., Dubrovskiy Yu.A. Coenotical diversity of vegetation of mountain-tundra and open woodland belts on the Manpupuner Ridge (Northern Urals, Pechoro-Ilychskiy Nature Reserve) // *Vegetation of Russia*. 2018. No. 34. P. 47–84 (in Russian). doi: 10.31111/vegrus/2018.34.47
39. Pierce S., Luzzaro A., Caccianiga M., Ceriani R.M., Cerabolini B. Disturbance is the principal α -scale filter determining niche differentiation, coexistence and biodiversity in an alpine community // *Journal of Ecology*. 2007. V. 95. No. 4. P. 698–706. doi: 10.1111/j.1365-2745.2007.01242.x
40. Degteva S.V., Dubrovskiy Yu.A. Forest vegetation of the Ilych basin within the boundaries of the Pechoro-Ilychsky Reserve. Sankt-Peterburg: Nauka, 2014. 291 p. (in Russian).
41. Degteva S.V., Kulyugina E.E., Dubrovskiy Yu.A., Novakovskiy A.B. Comparative analysis of cenofloras of mountain tundra on the western macroslope of the Northern and Subpolar Urals // *Theoretical and Applied Ecology*. 2014. No. 1. P. 16–21 (in Russian). doi: 10.25750/1995-301-2014-1-016-021
42. Novakovskiy A.B., Degteva S.V. Ecological and coenotic groups of species in phytocenoses of landscapes of the Northern and Subpolar Urals and the Urals // *Theoretical and Applied Ecology*. 2008. No. 1. P. 32–37 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2008-1-032-37

Влияние экологических факторов на генетический полиморфизм в природных популяциях *Fragaria vesca*

© 2023. Э. В. Бабынин, к. б. н., доцент,
С. А. Дубровная, к. б. н., доцент,
А. Р. Каюмов, д. б. н., доцент,

Казанский (Приволжский) федеральный университет,
420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18,
e-mail: sdubrovnaya@inbox.ru

Генетический полиморфизм ценопопуляций *Fragaria vesca* из республики Марий Эл был измерен методом случайно амплифицированной полиморфной ДНК (RAPD). Ценопопуляции были приурочены к различным стадиям сукцессии лесного фитоценоза. Ценопопуляции земляники в климаксовом фитоценозе и на участке вырубке данного леса отличались соотношением и интенсивностью полового и вегетативного размножения в процессе поддержания численности. На вырубке при высоких показателях интенсивности полового и вегетативного размножения, хорошо выраженных процессах образования семян не встречались особи семенного происхождения, поскольку в условиях высокой конкуренции с рудеральными и луговыми растениями медленно развивающиеся проростки земляники погибали. Прорастание семян и растения семенного происхождения отмечались в условиях климаксового фитоценоза, хотя здесь доля генеративных растений была крайне низкой. Для ценопопуляции, приуроченной к климаксовому лесу, индексы разнообразия Шеннона и генетического разнообразия Нея составили 0,5179 и 0,3613 соответственно. На вырубке индексы разнообразия Шеннона и генетического разнообразия Нея были ниже – 0,4573 и 0,3132 соответственно. Была показана потеря определённых генетических кластеров на вырубке, присутствующих в климаксовом лесу. Наши данные подтверждают положение о том, что климаксовые сообщества с их более стабильными условиями могут выступать регенерационными нишами вида.

Ключевые слова: клоновые растения, репродуктивная ниша, генетический полиморфизм, популяция, антропогенное воздействие, случайно амплифицированная полиморфная ДНК (RAPD).

The effect of ecological factors on genetic polymorphism in natural populations of *Fragaria vesca*

© 2023. E. V. Babynin ORCID: 0000-0003-2285-8879
S. A. Dubrovnaya ORCID: 0000-0001-5700-4203
A. R. Kayumov ORCID: 0000-0001-7195-1557
Kazan (Volga Region) Federal University,
18, Kremlevskaya St., Kazan, Russia, 420008,
e-mail: sdubrovnaya@inbox.ru

Genetic polymorphism of natural cenopopulations of wild strawberry (*Fragaria vesca*) from the Republic of Mari El was measured by randomly amplified polymorphic DNA (RAPD). The method of molecular genome marking based on RAPD-PCR makes it possible to determine the genetic status of populations and establish interpopulation relationships. The cenopopulations that we selected for the analysis were confined to different stages of the forest phytocenosis succession: the climatic phytocenosis and the area of the forest felling. These *F. vesca* cenopopulations differed in the ratio of sexual and vegetative reproduction during the maintenance of the cenopopulation size. In a felling area in conditions of greater illumination the intensity of sexual and vegetative reproduction increases. However, specimens of seed origin were not found in the felling area, since in conditions of high competition with ruderal and meadow plants, slowly developing strawberry seedlings died. The germination of seeds and plants of seed origin was noted under conditions of climatic phytocenosis. For the cenopopulation confined to the climax forest, Shannon's diversity index and Nei's genetic distance were 0.5179 and 0.3613 respectively. In a felling area vegetative reproduction processes predominate, so Shannon's diversity index and Nei's genetic distance were lower, 0.4573 and 0.3132 respectively. In a felling area revealed the loss of certain genetic clusters present in the climax forest. This indicates the loss of a strawberry genetic diversity in the transition to vegetative reproduction due to anthropogenic impact. Our data confirm the idea that climax communities with their more stable conditions can act as regenerative niches of the species.

Keywords: clonal plants, reproductive niche, genetic polymorphism, population structure, anthropogenic influence, RAPD.

Интенсивный характер антропогенной деятельности, связанный с деградацией естественных местообитаний видов, воздействием на них загрязняющих компонентов, внедрением новых видов, которые изменили характер конкуренции, приводит к обеднению генетической структуры существующих видов [1, 2]. Резкая трансформация экологической обстановки стала причиной снижения адаптивной способности видов, наблюдается глобальный, но незапланированный эволюционный эксперимент, оказывающий прямое воздействие на биотическое разнообразие планеты [3]. Понимание и прогнозирование реакции организмов на изменение окружающей среды, вызванное деятельностью человека, является основополагающим направлением в экологических исследованиях [4]. Чтобы оценить способность видов выживать в изменяющейся среде, необходимо выявить свойственный виду эколого-генетический потенциал устойчивости и факторы его определяющие. Объединение популяционно-генетических и эколого-демографических подходов в изучении популяции способствует расширению представления о популяционной структуре вида [5].

Большой интерес в изучении эколого-генетических механизмов адаптации представляют популяции клоновых растений в лесном фитоценозе, способные длительное время поддерживать численность ценопопуляции (ЦП) за счёт вегетативного размножения при подавлении полового процесса. Длительное расселение ограниченного числа генотипов в ходе вегетативного размножения ведёт к повышению частоты инбридинга, увеличению уровня гомозиготности, что способствует снижению воспроизводства популяции, выживаемости семенного потомства, к снижению репродуктивной способности, и в конечном итоге к увеличению риска вымирания [6].

Проведённые исследования демографических процессов в ЦП *Fragaria vesca* показали преобладание вегетативного размножения в поддержании численности ЦП в условиях мало нарушенных лесных фитоценозов. На деструктивных участках, по сравнению с лесным фитоценозом, интенсивность вегетативного размножения земляники возрастала более чем в три раза, отмечалось существенное увеличение интенсивности полового размножения – доля генеративных растений в онтогенетическом спектре достигала 50%, в то время как в условиях еловых лесов не превышала 4%. Однако, при хорошо выраженном процессе полового размножения проростки и особи семенного происхождения на

деструктивных участках выявлены не были. Они были обнаружены в инвазионно-регрессивных ЦП, приуроченных к малонарушенным климаксовым сообществам [7, 8].

Принимая во внимание, что характер размножения и особенности жизненного цикла в малонарушенных климаксовых сообществах и на деструктивных участках отличаются, можно ожидать, что это отразится на генетической гетерогенности ЦП.

В связи с этим была определена цель нашего исследования: сравнить генетический полиморфизм природных ценопопуляций *Fragaria vesca*, приуроченных к климаксовым и деструктивным сообществам.

Объекты и методы исследования

Объект исследования. Земляника лесная (*Fragaria vesca* L.) – многолетнее, поликарпическое, короткокорневищное, надземностолонообразующее растение. Является наиболее распространённым видом рода и существует с четырьмя подвидами, шестью формами и несколькими сортами [9]. Образцы были собраны в Республике Марий Эл в 2018 г. в лесном массиве, прилегающем к заповеднику «Большая Кокшага». Исследованный участок расположен в пределах бореальной лесной зоны Русской равнины в подзоне хвойно-широколиственных лесов. Территория сложена флювиогляциальными супесчаными и песчаными отложениями с глинистыми и суглинистыми прослойками. Растения *F. vesca* были собраны в ельнике липово-черничном, а также в прилегающем к нему деструктивном сообществе – четырёхлетней вырубке.

Характеристика местообитаний. 1. Деструктивное сообщество – вырубка в ельнике липово-черничном. Площадь – 4000 м². Видовое богатство травяно-кустарничкового яруса составило 49 видов. Были в полной мере представлены растения лесных сообществ, сохранившиеся после рубки древостоя, отмечено внедрение луговых, рудеральных видов.

2. Ельник липово-черничный. Почвы супесчаные. Сомкнутость полога – 0,8. Первый ярус образован елью европейской (*Picea abies* (L.) N. Karst), липой сердцевидной (*Tilia cordata* Mill.), с участием сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), берёзы повислой (*Betula pendula* Roth.). Видовое разнообразие травяно-кустарничкового яруса было представлено 23 видами покрытосеменных растений.

Сбор материала. В пределах вырубке и лесного сообщества были заложены временные

трансекты, расстояние между которыми составило 5 м. Через каждые 5 м вдоль трансекты проводили сбор образцов. В условиях ельника, ввиду низкой встречаемости земляники, расстояние в пределах трансекты между отобранными образцами варьировало от 5 до 20 м. Для характеристики состояния ЦП анализировали следующие показатели: число образовавшихся рамет, число плодов – земляничин (в дальнейшем использовали термин «ягода»). Данные показатели анализировали у тридцати растений среднеговозрастного генеративного онтогенетического состояния (g_2). Особенности реализации полового размножения оценивали на основе подсчёта семязачатков в цветках – потенциальная семенная урожайность (ПСУ) и подсчёта полноценных семян в плодах – реальная семенная урожайность (РСУ). Определяли экологическую плотность ЦП, долю растений генеративного периода, растений молодого (g_1), среднеговозрастного (g_2) и старого (g_3) генеративного онтогенетических состояний.

Выделение ДНК. Геномная ДНК была выделена из свежих листьев одиночных взрослых растений методом, предложенным в [10]. После экстракции качество и концентрацию ДНК определяли с помощью спектрофотометра NanoDrop 2000 («Thermo Scientific», USA). Выделенную ДНК хранили при $-20\text{ }^\circ\text{C}$ до момента использования. Образцы ДНК, полученные от растений из ельника липово-черничного, обозначались символом – w, а образцы ДНК растений на вырубке символом – f.

RAPD-амплификация. RAPD-амплификацию проводили с 11 коммерчески 10-нуклеотидными праймерами (ЗАО Евроген, г. Москва) (табл. 1). Оптимальные

параметры RAPD-амплификации для земляники были определены экспериментально по наибольшему количеству фрагментов и отчётливых полос. Для ПЦР был приготовлен раствор, содержащий буфер ПЦР (1x), MgCl_2 (2,5 мМ), dNTPmix (0,2 мМ), праймер (25 нг), Taq ДНК-полимеразу (1 ед.) и ДНК (10–20 нг). Амплификацию выполняли в ПЦР амплификаторе C1000 Touch Thermal Cycler (Bio-Rad), запрограммированном на начальную денатурацию при $95\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 5 мин, затем 45 циклов при $94\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 1 мин, $44\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 1 мин и $72\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 1 мин, с последующим заключительным этапом удлинения праймера при $72\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 7 мин.

Продукты ПЦР амплификации подвергали электрофорезу в 1,5–2,0% агарозном геле для достижения адекватного разделения полос ДНК. Гель окрашивали в растворе Midori Green Advance и визуализировали с помощью ультрафиолетового света в системе GelDocXR+ (BioRad, USA). Для определения длины фрагментов ДНК использовали маркер молекулярной массы «DNA Ladder 100+ bp» (ЗАО Евроген, г. Москва).

Анализ данных. Амплифицированные фрагменты ДНК для каждого праймера оценивали как присутствующие (1) или отсутствующие (0) в двоичном виде. Полосы с одинаковым расстоянием миграции считались гомологичными и вводились в матрицу двоичных данных. Показатели генетического разнообразия, такие как информационный индекс Шеннона (I) [11], индекс разнообразия генов Нея (h) [12], а также генетическую дистанцию между популяциями (D) определяли с использованием программного

Таблица 1 / Table 1
Нуклеотидные последовательности праймеров, используемых в этом исследовании
Nucleotide sequences of the primers used in this study

№ No.	Код праймера Primer codes	Нуклеотидная последовательность Nucleotide sequences
1	OPB08	GTCCACACGG
2	OPB19	ACCCCCGAAG
3	OPA15	TTCCGAACCC
4	OPA16	AGCCAGCGAA
5	OPA17	GACCGCTTGT
6	OPA20	GTTGCGATCC
7	OPG11	TGCCCCGTCGT
8	OPG14	GGATGAGACC
9	OPG18	GGCTCATGTG
10	OPA8	GTGACGTAGG
11	OPA10	GTGATCGCAG

Таблица 2 / Table 2

Показатели интенсивности вегетативного и полового размножения земляники лесной в различных местообитаниях
Indicators of the intensity of vegetative and sexual reproduction of *Fragaria vesca* in various habitats

Местообитания Habitat	Показатели / Indicators					
	число рамет на материнском растении the number of ramets on the mother plant	длина столонов (см) length of stolons (sm)	число плодов на растении number of fruits per plant	доля (%) цветущих растений (g1+g2+g3) proportion (%) of flowering plants (g1+g2+g3)	семенная урожайность seed yield	
					ПСУ PSY	PCY ASY
Климаксовый фитоценоз Climax phytocenosis	2***	79*	1,5***	2,3***	47***	41***
Вырубка Felling	7	87	6,0	57	120	113

Примечание: * $p < 0,05$; *** $p < 0,001$; ПСУ – потенциальная семенная урожайность; PCY – реальная семенная урожайность.

Note: * $p < 0.05$; *** $p < 0.001$; PSY – potential seed yield; ASY – actual seed yield.

обеспечения POPGENE [13]. Дендрограмма была построена в соответствии с методом невзвешенной парной группы со средними арифметическими (UPGMA) с помощью программы NTSYS-PC Ver. 2.02e.

При отсутствии нормального распределения учитывали медиану (Me). Для проверки гипотезы о равенстве генеральных средних двух независимых выборок использовали непараметрический критерий Уилкоксона-Манна-Уитни. Использованы стандартные обозначения уровня значимости: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

Результаты и обсуждение

Анализ репродуктивной системы *Fragaria vesca*. В условиях низкой освещённости климаксовых фитоценозов переход к половому размножению для растений земляники затруднён, поддержание численности ЦП происходило за счёт вегетативного размножения. Однако интенсивность процесса невысокая. Среднее число рамет на особь составляло два экземпляра (табл. 2). При этом большая часть рамет укоренялась на расстоянии 40–80 см от материнского растения, максимальное удаление рамет составило 100–120 см. Ограниченное расселение рамет способствовало формированию изолированных скоплений, представленных, как правило, нецветущими растениями. Экологическая плотность в скоплении составила 4,6 экземпляра на 1 м².

В условиях деструктивных сообществ за счёт вегетативного размножения отмечалось существенное увеличение плотности ЦП. На

отдельных площадках плотность достигала 182 рамет на 1 м². Средний показатель экологической плотности составил 36,4. При хорошо выраженных процессах полового размножения (табл. 2) и высоких показателях завязываемости семян их прорастание в условиях вырубки практически невозможно. Проростки земляники, по сравнению с проростками других двудольных растений, из семян развиваются крайне медленно [14], они характеризуются низкой конкурентной способностью по сравнению с растениями рудеральных и луговых фитоценозов. Особи семенного происхождения также не были обнаружены на вырубке.

Полиморфизм ДНК. Анализ генетического полиморфизма был проведён методом RAPD. Метод RAPD хорошо зарекомендовал себя при анализе полиморфизма растений рода *Fragaria* [15–19]. Имеются данные об обнаружении хорошего соответствия между значениями генетического сходства, основанными на маркерах RAPD, и информацией о родословной для восьми различных сортов *Fragaria × ananassa* [16]. Было продемонстрировано, что генетическая архитектура популяций р. *Fragaria* может сильно различаться из-за пространственных вариаций клонального и полового воспроизводства [20].

В ходе наших работ из 11 оценённых праймеров маркеров RAPD три праймера показали высокую степень полиморфизма и давали стабильный результат из хорошо различимых полос. Размер полученных фрагментов (от 200 до 1500 пн) соответствует размерам, указанным в литературе для праймеров RAPD [21]. Дру-

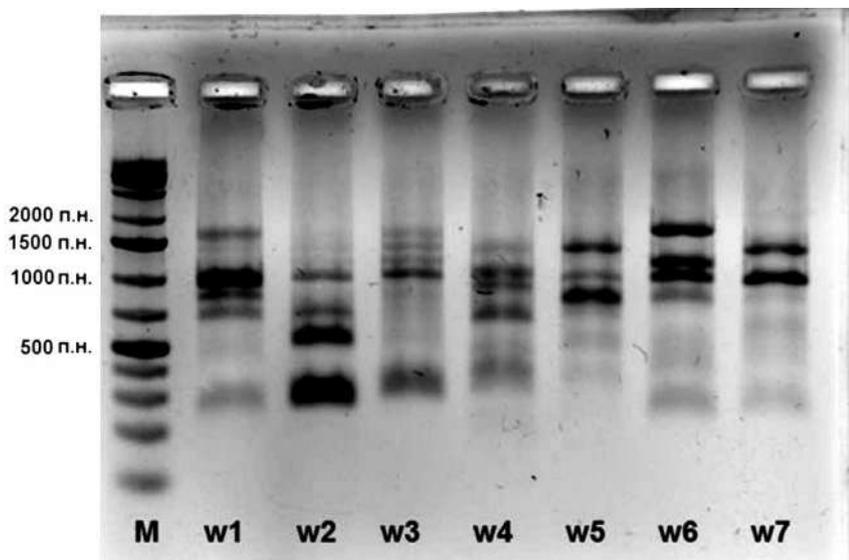


Рис. 1. Паттерн полос образцов *Fragaria vesca* в агарозном геле с использованием праймера OPB08; M – маркер длин ДНК; w1-7 – номера образцов ДНК
Fig. 1. Agarose gel electrophoresis of randomly primed DNA amplifications of *Fragaria vesca* with primer OPB08; M – DNA size marker; w1-7 – numbers of DNA samples

гие праймеры давали низкое качество амплификации или низкий уровень полиморфизма и не рассматривались в окончательном анализе данных.

Выбранные 3 праймера суммарно дали 30 амплифицированных полос, из которых 22 были полиморфными (табл. 3). Локус считался полиморфным, если полоса присутствовала у одних особей и отсутствовала у других, и была мономорфной, если полоса присутствовала у всех особей одного вида (рис. 1). В соответствии с процентным содержанием полиморфной ДНК из трёх праймеров, средний процент полиморфной ДНК превышает 70%, поэтому можно сказать, что эти три праймера имеют высокий уровень полиморфизма и могут быть использованы в анализе генетической изменчивости земляники.

По результатам проделанного нами RAPD-анализа были построены дендрограммы, показывающие степень генетического сходства между растениями земляники, собранными в лесу и на вырубке (рис. 2). На дендрограмме выборка растений земляники была разделена на три кластера (I, II и III) на уровне сходства 65%. Растения с вырубке группируются в основном в одном кластере II. Растения, произрастающие в лесу, присутствуют во всех трёх кластерах, при этом кластер III включает в себя только лесные растения.

Ряд ДНК-маркеров, таких как RAPD, AFLP, SSR и ISSR, используется в исследованиях генетической структуры популяций, оценки филогенетических отношений и генетического разнообразия, построения генетических карт и идентификации сортов

Таблица 3 / Table 3

Общий полиморфизм полос, полученных в RAPD анализе для популяций *Fragaria* в лесу и на вырубке / Summary of polymorphic bands generated by randomly amplified polymorphic DNA (RAPD) applied to two local populations of *Fragaria*

Код праймера Primer codes	Число полос Number of bands	Число полиморфных полос Number of polymorphic bands	Количество полиморфных полос, % Number of polymorphic bands, %
OPB08	10	7	70,0
OPA20	9	7	77,8
OPG18	11	8	72,7
Общее число Total number	30	22	73,3

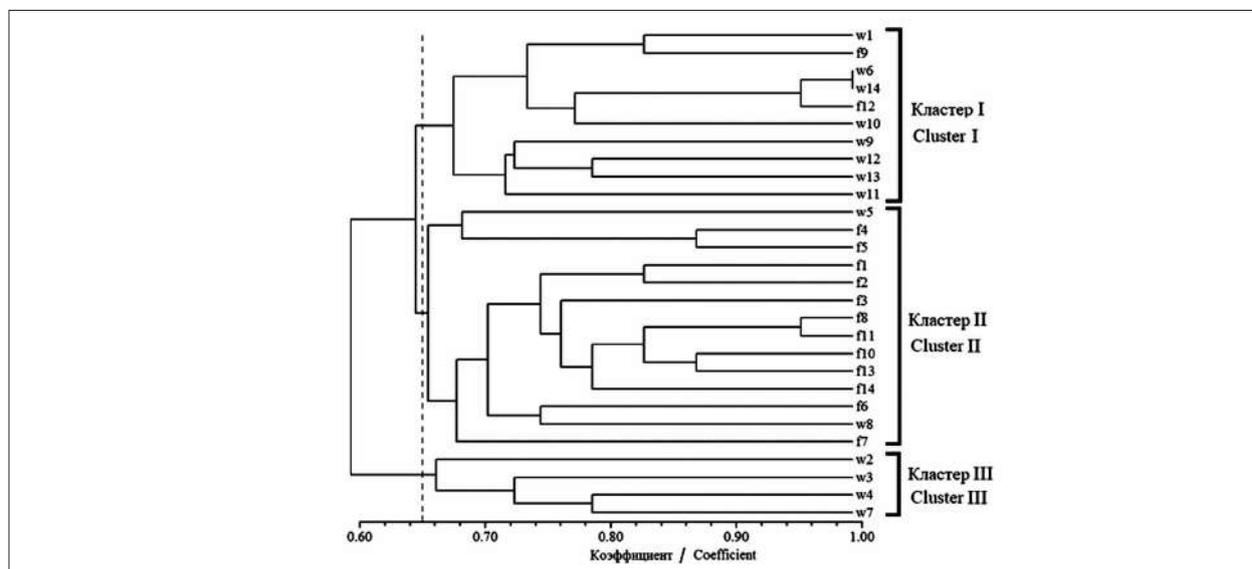


Рис. 2. Дендрограмма, основанная на данных RAPD, показывающая отношения между растениями, собранными на вырубке (f) и в лесу (w)

Fig. 2. Dendrograms of cluster analysis highlighting phylogenetic relationships among the plants *Fragaria vesca* collected in the felling area (f) and in the forest (w) based on RAPD molecular markers

[22–25]. Анализ генетического разнообразия с помощью метода RAPD считается одним из основных методов, поскольку он не требует предварительной информации о последовательности ДНК и для его использования необходимо очень небольшое количество ДНК.

Чтобы сравнить степень генетической дивергенции популяций, была оценена стандартная генетическая дистанция (D) [11]. Генетическая дистанция между популяциями была небольшой ($D = 0,1161$), а значение генетической идентичности Нея, напротив, составило 0,8904. Эти показатели указывают на низкую генетическую дифференциацию между двумя популяциями. Высокое сходство между этими сообществами закономерно, так как эти сообщества находятся в непосредственной близости друг от друга, а имеющиеся различия могут быть связаны только с формированием экологической дифференциации между ними.

Анализ генетического полиморфизма взятых нами ЦП, рассчитанный с помощью информационного индекса Шеннона (I) и разнообразия генов $Nei (h)$, показал, что ЦП в климаксовом сообществе была более полиморфной ($I = 0,5179, h = 0,3613$), чем ЦП на вырубке ($I = 0,4573, h = 0,3132$), что связано с прорастанием семян в климаксовом фитоценозе. Мы также не можем исключить, что семена растений, произрастающих на вырубке, могут распространяться под полог леса, где они имеют больше шансов для прорастания. Перенос семян из других фитоценозов и успешное

прохождение начальных стадий онтогенеза в климаксовом сообществе является важным механизмом снижения инбридинга в популяциях.

Заключение

Изменения эколого-ценотических условий, связанные с вырубкой лесов, способствуют активизации процессов полового и вегетативного размножения. В то же время гибель проростков и разрастание отдельных генотипов ведёт к снижению генетического полиморфизма популяции земляники на деструктивных участках. Индексы разнообразия Шеннона и генетического разнообразия Нея составили 0,4573 и 0,3132, в то время как в условиях климаксового леса, где доля генеративных растений была менее 5%, индексы разнообразия Шеннона и генетического разнообразия Нея составили 0,5179 и 0,3613 соответственно. Климаксовые фитоценозы с их более стабильными условиями являются регенерационными нишами вида. Здесь отмечается прорастание семян, образованных на деструктивных участках. Показатели генетического полиморфизма двух ЦП были достаточно схожи, что может быть связано с взаимопроникновением генотипов, наличие ДНК, характерных только для лесной популяции, отражает вероятностный характер переноса сюда семян из других участков леса. Сочетание деструктивных и относительно ненарушенных лесных фитоценозов способствует поддержа-

нию внутривидовой популяционной генетической полиморфизма.

Работа выполнена за счёт средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета (ПРИОРИТЕТ-2030).

Литература

1. Carroll S.P., Jorgensen P.S., Kinnison M.T., Bergstrom C.T., Denison R.F., Gluckman P., Smith T.B., Strauss S.Y., Tabashni B.E. Applying evolutionary biology to address global challenges // *Science*. 2014. V. 346. P. 313–325.
2. Hendry A.P., Gotanda K.M., Svensson E.I. Human influences on evolution, and the ecological and societal consequences // *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*. 2017. V. 372. Article No. 20160028.
3. Smith T.B., Bernatchez L. Evolutionary change in human-altered environments // *Molecular Ecology*. 2008. V. 17. No. 1. P. 1–8.
4. Andrew A., Bernatchez L., Bonin A., Buerkle C.A., Carstens B., Emerson B., Garant D., Giraud T., Kane N., Rogers S.R., Slate J., Smith H., Sork V., Stone G., Waits L., Widmer A., Rieseberg L. A roadmap for molecular ecology // *Molecular Ecology*. 2013. V. 22. No. 10. P. 2605–2626.
5. Готов Н.В. Оценка генетической гетерогенности природных популяций: количественные признаки // *Экология*. 1983. № 1. С. 3–10.
6. Charlesworth D., Willis J.H. The genetics of inbreeding depression // *Nature Reviews Genetics*. 2009. V. 10. No. 11. P. 783–796.
7. Дубровная С.А. Динамика онтогенетической и пространственной структуры ценопопуляции *Fragaria vesca* (Rosaceae) // *Растительные ресурсы*. 2011. Т. 47. № 1. С. 3–15.
8. Дубровная С.А. Жизненный цикл и регенерационные ниши травянистых растений в лесных сообществах // *Сибирский лесной журнал*. 2016. № 3. С. 24–33.
9. Staudt G.S. The species of *Fragaria*, their taxonomy and geographical distribution // *Acta Horticulturae*. 1989. V. 265. P. 23–34.
10. Dellaporta S.L., Wood J., Hicks J.B. A plant DNA mini-preparation: Version II // *Plant Mol Biol Rep*. 1983. V. 1. No. 4. P. 19–21.
11. Lewontin R.C. The apportionment of human diversity // *Evolutionary Biology*. 1972. V. 6. P. 381–398.
12. Nei M. The genetic distance between populations // *American Naturalist*. 1972. V. 106. P. 283–292.
13. Yeh F.C., Yang R., Boyle T. Popgene. Version 1.31. Microsoft window based freeware for population genetic analysis. Alta, Canada: Centre for International Forestry Research, University of Alberta and Tim Boyle, Edmonton, 1999. 29 p.
14. Ведерникова О.П., Дубровная С.А. Онтогенез земляники лесной // *Онтогенетический атлас лекарственных растений*. Т. 1. Йошкар-Ола: МарГУ, 1997. С. 196–202.
15. Aristya G.R., Kasiamdari R.S., Setyoningrum R., Larasati B. Genetic variations of strawberry cultivars of *Fragaria × ananassa* and *Fragaria vesca* based on RAPD // *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*. 2019. V. 20. No. 3. P. 770–775.
16. Graham J., McNicol R.J., McNicol J.W. A comparison of methods for the estimation of genetic diversity in strawberry cultivars // *Theoretical and Applied Genetics*. 1996. V. 93. P. 402–406.
17. Harrison R.E., Luby J.J., Furnie G.R., Hancock J.F. Differences in the apportionment of molecular and morphological variation in North American strawberry and the consequences for genetic resource management // *Genetic Resources and Crop Evolution*. 2000. V. 47. P. 647–657.
18. Degani C., Rowland L.J., Saunders J.A., Hokanson S.C., Ogden E.L., Golan-Goldhirsh A., Galletta G.J. A comparison of genetic relationship measures in strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.) based on AFLPs, RAPDs, and pedigree data // *Euphytica*. 2001. V. 117. P. 1–12.
19. Sugimoto T., Tamaki K., Matsumoto J., Yamamoto Y., Shiwaku K., Watanabe K. Detection of RAPD markers linked to the everbearing gene in Japanese cultivated strawberry // *Plant Breeding*. 2005. V. 124. No. 5. P. 498–501.
20. Wilk J.A., Kramer A.T., Ashley M.V. High variation in clonal vs. sexual reproduction in populations of the wild strawberry, *Fragaria virginiana* (Rosaceae) // *Annals of Botany*. 2009. V. 104. No. 7. P. 1413–1419.
21. Williams J.G., Kubelik A.R., Livak K.J., Rafalski J.A., Tingey S.V. DNA polymorphisms amplified by arbitrary primers are useful as genetic markers // *Nucleic Acids Res*. 1990. V. 18. No. 25. P. 6531–6535.
22. Bartish I.V., Jeppsson N., Nybom H. Population genetic structure in the dioecious pioneer plant species *Hippophae rhamnoides* investigated by random amplified polymorphic DNA (RAPD) markers // *Molecular Ecology*. 1999. V. 8. P. 791–802.
23. Congiu L., Chicca M., Cella R., Rossi R., Bernacchia G. The use of random amplified polymorphic DNA (RAPD) markers to identify strawberry varieties: a forensic application // *Molecular Ecology*. 2000. V. 9. P. 229–232.
24. Allnutt T.R., Newton A.C., Premoli A., Lara A. Genetic variation in the threatened South American conifer *Pilgerodendron uviferum* (Cupressaceae), detected using RAPD markers // *Biological Conservation*. 2003. V. 114. P. 245–253.
25. Фархутдинов Р.Г., Саитова З.Р., Кулуев Б.Р., Григориади А.С., Федяев В.В., Гарипова М.И., Новоселова Е.И., Ямалеева А.А. Физиолого-биохимические и генетические параметры в популяциях лишайника *Physcia stellaris* Nyl. в зависимости от уровня загрязнения // *Теоретическая и прикладная экология*. 2020. № 1. С. 77–83.

References

1. Carroll S.P., Jorgensen P.S., Kinnison M.T., Bergstrom C.T., Denison R.F., Gluckman P., Smith T.B., Strauss S.Y., Tabashni B.E. Applying evolutionary biology to address global challenges // *Science*. 2014. V. 346. P. 313–325. doi: 10.1126/science.1245993
2. Hendry A.P., Gotanda K.M., Svensson E.I. Human influences on evolution, and the ecological and societal consequences // *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*. 2017. V. 372. Article No. 20160028. doi: 10.1098/rstb.2016.0028
3. Smith T.B., Bernatchez L. Evolutionary change in human-altered environments // *Molecular Ecology*. 2008. V. 17. No. 1. P. 1–8. doi: 10.1111/j.1365-294X.2007.03607.x
4. Andrew A., Bernatchez L., Bonin A., Buerkle C.A., Carstens B., Emerson B., Garant D., Giraud T., Kane N., Rogers S.R., Slate J., Smith H., Sork V., Stone G., Waits L., Widmer A., Rieseberg L. A roadmap for molecular ecology // *Molecular Ecology*. 2013. V. 22. No. 10. P. 2605–2626. doi: 10.1111/mec.12319
5. Glotov N.V. Assessment of genetic heterogeneity of natural populations: Quantitative traits // *Ekologiya*. 1983. No. 1. P. 3–10 (in Russian).
6. Charlesworth D., Willis J.H. The genetics of inbreeding depression // *Nature Reviews Genetics*. 2009. V. 10. No. 11. P. 783–796. doi: 10.1038/nrg2664
7. Dubrovnaya S.A. Dynamics of ontogenetic and spatial structure of *Fragaria vesca* (Rosaceae) coenopopulations // *Rastitel'nyye resursy*. 2011 V. 47. No. 1. P. 3–15 (in Russian).
8. Dubrovnaya S.A. Life cycle and regeneration niches of herbaceous plants in forest communities // *Sibirskiy Lesnoy Zhurnal* (Siberian Journal of Forest Science). 2016. No. 3. P. 24–33 (in Russian). doi: 10.15372/SJFS20160303
9. Staudt G.S. The species of *Fragaria*, their taxonomy and geographical distribution // *Acta Horticulturae*. 1989. V. 265. P. 23–34. doi: 10.17660/actahortic.1989.265.1
10. Dellaporta S.L., Wood J., Hicks J.B. A plant DNA mini-preparation: Version II // *Plant Mol Biol Rep*. 1983. V. 1. No. 4. P. 19–21. doi: 10.1007/BF02712670
11. Lewontin R.C. The apportionment of human diversity // *Evolutionary Biology*. 1972. V. 6. P. 391–398. doi: 10.1007/978-1-4684-9063-3_14
12. Nei M. The genetic distance between populations // *American Naturalist*. 1972. V. 106. P. 283–292.
13. Yeh F.C., Yang R., Boyle T. Popgene. Version 1.31. Microsoft window based freeware for population genetic analysis. Alta, Canada: Centre for International Forestry Research, University of Alberta and Tim Boyle, Edmonton, 1999. 29 p.
14. Vedernikova O.P., Dubrovnaya S.A. Ontogeny of *Fragaria vesca* // *Ontogenetic atlas of medicinal plants*. V. 1. Yoshkar-Ola: MarGU, 1997. P. 196–202 (in Russian).
15. Aristya G.R., Kasiamdari R.S., Setyoningrum R., Larasati B. Genetic variations of strawberry cultivars of *Fragaria × ananassa* and *Fragaria vesca* based on RAPD // *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*. 2019. V. 20. No. 3. P. 770–775. doi: 10.13057/biodiv/d200322
16. Graham J., McNicol R.J., McNicol J.W. A comparison of methods for the estimation of genetic diversity in strawberry cultivars // *Theoretical and Applied Genetics*. 1996. V. 93. P. 402–406. doi: 10.1007/BF00223182
17. Harrison R.E., Luby J.J., Furnie G.R., Hancock J.F. Differences in the apportionment of molecular and morphological variation in North American strawberry and the consequences for genetic resource management // *Genetic Resources and Crop Evolution*. 2000. V. 47. P. 647–657. doi: 10.1023/A:1026530125493
18. Degani C., Rowland L.J., Saunders J.A., Hokanson S.C., Ogden E.L., Golan-Goldhirsh A., Galletta G.J. A comparison of genetic relationship measures in strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.) based on AFLPs, RAPDs, and pedigree data // *Euphytica*. 2001. V. 117. P. 1–12. doi: 10.1023/A:1004008408435
19. Sugimoto T., Tamaki K., Matsumoto J., Yamamoto Y., Shiwaku K., Watanabe K. Detection of RAPD markers linked to the everbearing gene in Japanese cultivated strawberry // *Plant Breeding*. 2005. V. 124. No. 5. P. 498–501. doi: 10.1111/J. 1439-0523.2005.01144.X
20. Wilk J.A., Kramer A.T., Ashley M.V. High variation in clonal vs. sexual reproduction in populations of the wild strawberry, *Fragaria virginiana* (Rosaceae) // *Annals of Botany*. 2009. V. 104. No. 7. P. 1413–1419. doi: 10.1093/aob/mcp239
21. Williams J.G., Kubelik A.R., Livak K.J., Rafalski J.A., Tingey S.V. DNA polymorphisms amplified by arbitrary primers are useful as genetic markers // *Nucleic Acids Res*. 1990. V. 18. No. 25. P. 6531–6535.
22. Bartish I.V., Jeppsson N., Nybom H. Population genetic structure in the dioecious pioneer plant species *Hippophae rhamnoides* investigated by random amplified polymorphic DNA (RAPD) markers // *Molecular Ecology*. 1999. V. 8. P. 791–802. doi: 10.1046/j.1365-294X.1999.00631.x
23. Congiu L., Chicca M., Cella R., Rossi R., Bernacchia G. The use of random amplified polymorphic DNA (RAPD) markers to identify strawberry varieties: a forensic application // *Molecular Ecology*. 2000. V. 9. P. 229–232. doi: 10.1046/j.1365-294x.2000.00811
24. Allnutt T.R., Newton A.C., Premoli A., Lara A. Genetic variation in the threatened South American conifer *Pilgerodendron uviferum* (Cupressaceae), detected using RAPD markers // *Biological Conservation*. 2003. V. 114. P. 245–253. doi: 10.1016/S0006-3207(03)00044-2
25. Farkhutdinov R.G., Saitova Z.R., Kuluev B.R., Grigoriadi A.S., Fedyaev V.V., Garipova M.I., Novoselova E.I., Yamaleeva A.A. Physiological, biochemical, and genetic parameters of the lichen *Physcia stellaris* Nyl. populations depending on the level of pollution // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 1. P. 77–83 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4304-2020-1-077-083

Биологическое разнообразие бухты Круглой и перспективы создания орнитологического заказника (юго-западный Крым, Чёрное море)

© 2023. **В. Е. Гилагосов**, к. б. н., с. н. с.,
Н. А. Мильчакова, к. б. н., в. н. с., **Е. П. Карпова**, к. б. н., с. н. с.,
С. А. Ковардаков, к. б. н., с. н. с., **Л. В. Бондарева**, к. б. н., с. н. с.,
 Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского,
 299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2,
 e-mail: milchakova@gmail.com

С ростом урбанизации, вызывающей ухудшение экологической обстановки в городах, всё более актуальной становится задача сохранения природных и квазиприродных комплексов селитебных зон. Цель работы: выполнить анализ разнообразия гидрофильной орнитофауны и природных комплексов для обоснования создания орнитологического заказника в бухте Круглой (Крым, Чёрное море). По данным многолетних исследований охарактеризовано разнообразие морской флоры и фауны, биотопов и прибрежной растительности. В состав орнитофауны входит 74 вида из 43 родов, 14 семейств и 9 отрядов. Отряды Charadriiformes, Anseriformes и Ciconiiformes объединяют 57 видов (77% общего числа видов). Численность птиц в зимний период достигает 0,99–1,38 тыс. особей. Отмечено пребывание 11 охраняемых видов, в том числе 10 видов, занесённых в Красную книгу РФ. Природные комплексы бухты наиболее привлекательны для зимующих гидрофильных птиц, в меньшей степени – для транзитно мигрирующих, кочующих и гнездящихся видов. Флора морских макрофитов и сосудистых растений прибрежной зоны объединяет 141 вид, среди которых 17 охраняемых. В состав ихтиофауны и беспозвоночных бентоса входит 60 и 124 вида, соответственно, в том числе 9 – охраняемых. Установлена высокая природоохранная ценность бухты, связанная с формированием крупных сезонных скоплений гидрофильных птиц, высокой степенью разнообразия биоты, наличием охраняемых видов и биотопов. Рекомендовано создание орнитологического заказника с временным режимом (в зимний период) в б. Круглой, первого объекта такой категории в структуре заповедной сети города Севастополя и в целом Крыма. Формирование особо охраняемой природной территории позволит сохранить биотопы и места гнездования птиц, раритетную флору и фауну, уязвимые растительные группировки, ввести некоторые ограничения на природопользование и добычу биоресурсов.

Ключевые слова: гидрофильные птицы, биота, биоценоз, особо охраняемые природные территории, Севастополь, Чёрное море.

Features of the biological diversity of the Kruglaya Bay and the prospects for creating an ornithological reserve (southwestern Crimea, Black Sea)

© 2023. **V. E. Giragosov** ORCID: 0000-0002-1637-7449[†]
N. A. Milchakova ORCID: 0000-0001-5407-7706[†], **E. P. Karpova** ORCID: 0000-0001-9590-9302[†]
S. A. Kovardakov ORCID: 0000-0002-1133-671X[†], **L. V. Bondareva** ORCID: 0000-0002-2872-070X[†]
 A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS,
 2, Nakhimova Ave., Sevastopol, Russia, 299011,
 e-mail: milchakova@gmail.com

This work aimed to analyze the diversity of hydrophilic avifauna and natural complexes to substantiate the creation of an ornithological reserve in the Kruglaya Bay (Crimea, Black Sea). The diversity of biotopes, marine and coastal flora, and fauna characterized on the basis of long-term research data. The avifauna includes 74 species from 43 genera, 14 families, and 9 orders. The orders Charadriiformes, Anseriformes and Ciconiiformes unite 57 species (77% of the total number of species). The number of birds in winter reaches 0.99–1.38 thousand individuals. There are 11 protected species in the avifauna, including 10 species listed in the Red Data Book of the Russian Federation. The natural complexes of the bay are most attractive for wintering hydrophilic birds, and to a lesser extent – for transit migrating, nomadic and nesting species. The flora of marine macrophytes and coastal vascular plants comprises 141 species, including 17 protected ones. The ichthyofauna and benthic invertebrates contain 60 and 124 species, respectively, including 9 protected

ones. The high environmental value of the bay is associated with the formation of large seasonal clusters of hydrophilic birds, a high degree of biota diversity, the presence of many protected species and biotopes. We are recommended to create an ornithological reserve with a temporary regime (in winter) in the Kruglaya Bay. The new reserve will be the first ornithological object of this category in the nature-protected network of Sevastopol and Crimea. Its formation will allow to preserve biotopes and nesting places of birds, rare flora and fauna, and introduce some restrictions on environmental management and extraction of bioresources.

Keywords: hydrophilic birds, biota, biocenosis, specially protected natural areas, Sevastopol, Black Sea.

Бухта Круглая входит в состав комплекса морских водоёмов Севастополя, насчитывающего свыше 30 бухт. Первые исследования её биоты относятся к началу прошлого века [1], в последние десятилетия опубликованы данные о состоянии ключевых звеньев прибрежной экосистемы, разнообразии донных биоценозов, ихтиофауны и растительности берегов [2–4]. С 1978 г. проводятся наблюдения за фауной птиц, что связано с формированием в бухте зимнего гидрофильного орнитокомплекса, одного из крупнейших на юге Крыма [5–8]. Учитывая выявленное обилие охраняемых видов и биотопов в экосистеме бухты Круглой и её высокую природоохранную значимость, в 2000 г. впервые было предложено создание здесь памятника природы регионального значения – прибрежно-аквального комплекса [9]. Хотя этот объект не был создан по разным причинам, тем не менее, актуальной природоохранной задачей является сохранение ценных природных комплексов бухты, особенно в условиях увеличения антропогенной нагрузки на её акваторию и береговую зону. Поэтому цель работы заключалась в обобщении и анализе данных о биологическом разнообразии бухты Круглой и обосновании создания в её акватории орнитологического заказника, первого в г. Севастополе и юго-западном Крыму.

Материал и методы исследования

Площадь акватории б. Круглой составляет 0,64 км², её водосборная площадь – около 5 км², длина 1,3 км, максимальная ширина – 0,8 км, протяжённость береговой линии – 3,5 км [3]. Средняя глубина не превышает 5 м, в вершине бухты глубина варьирует от 0,5 до 2 м (рис. 1). По нашим многолетним наблюдениям солёность изменяется от 11,65 до 17,92‰ из-за поступления терригенных стоков, разгрузки подземных вод, аварийных сбросов хозяйственно-бытовых стоков. Акватория отнесена к условно-чистым [10]. Высокая антропогенная нагрузка характерна для летнего периода.

Гидробиологические, орнитологические и геоботанические исследования проведены с 2009 по 2020 гг. по стандартным методикам [11–14]. Определение видов птиц и учёт их численности вели методом маршрутных наблюдений 2–4 раза в месяц. Ихтиологический материал отбирали при помощи буксируемого криветочного сака площадью 1 м² с сетью (размер ячеи 6,5 мм). Макрофитобентос описан по 7 профилям на глубинах от 0,5 до 15 м, макрозообентос – по опубликованным данным [4, 15–19]. Русские и латинские названия птиц приведены по [20], рыб – по [21], макрородослей – по [22], сосудистых растений – по [23], названия синтаксонов – по [24].

Статистические расчёты выполнены при помощи пакета инструментов MS Excel 2019. В сравниваемых выборках по численности птиц рассчитывали среднюю арифметическую величину и стандартное отклонение.



Рис. 1. Карта-схема бухты Круглой
Fig. 1. Map of the Kruglaya Bay

Результаты и обсуждение

Гидрофильный орнитокомплекс. Орнитофауна представлена 74 видами из 43 родов, 14 семейств и 9 отрядов. Наибольшая видовая насыщенность характерна для отрядов ржанкообразные Charadriiformes – 28 видов (37,8% общего количества видов), гусеобразные Anseriformes – 22 (29,7%) и аистообразные Ciconiiformes – 7 (9,5%). В других отрядах насчитывается от одного до пяти видов. По единичным залётам известно 30 видов, их пребывание ограничено фактором беспокойства или нетипичностью района для зимовки и/или транзитных миграций. Среди них, например, малый лебедь (*Cygnus bewickii* Yarrell, 1830), белоглазый нырок (*Aythya nyroca* (Gldenstdt, 1770)), круглоносый плавунчик (*Phalaropus lobatus* (Linnaeus, 1758)), большой веретенник (*Limosa limosa* (Linnaeus, 1758)), белощёкая крачка (*Chlidonias hybrida* (Pallas, 1811)) и др.

В период сезонных миграций регулярно встречаются 12 видов, в том числе лысуха (*Fulica atra* Linnaeus, 1758), красноглазый нырок (*Aythya ferina* (Linnaeus, 1758)), хохлатая чернеть (*Aythya fuligula* (Linnaeus, 1758)), чомга (*Podiceps cristatus* (Linnaeus, 1758)), 5 видов чаек и др. К нерегулярно мигрирующим относится 19 видов, в том числе лебедь-кликун (*Cygnus cygnus* (Linnaeus, 1758)), свиязь (*Anas penelope* Linnaeus, 1758), шилохвость (*Anas clypeata* Linnaeus, 1758), малый зуёк (*Charadrius dubius* Scopoli, 1786), бекас (*Gallinago gallinago* (Linnaeus, 1758)) и другие, их численность незначительна.

В составе зимнего орнитокомплекса выявлено 28 видов, из которых 8 видов зимуют ежегодно и 20 – нерегулярно. Некоторые из них появляются лишь в периоды значительных похолоданий и замерзания водоёмов на севере Крымского полуострова, среди них чернозобик (*Calidris alpina* (Linnaeus, 1758)), исландский песочник (*Calidris canutus* (Linnaeus, 1758)) и др. В летний период встречается до 12 видов, наиболее обычны средиземноморская чайка (*Larus michahellis* J.F. Naumann, 1840), большой баклан (*Phalacrocorax carbo* (Linnaeus, 1758)), камышница (*Gallinula chloropus* (Linnaeus, 1758)) и кряква (*Anas platyrhynchos* Linnaeus, 1758). Формирование летнего орнитокомплекса ограничивает фактор беспокойства из-за высокой рекреационной нагрузки.

Наибольшее количество видов птиц выявлено в зимний период, в основном в январе – феврале, реже наблюдается смещение максимума на сезон миграций, так, например,

в апреле 2020 г. (рис. 2). Основу зимнего орнитокомплекса составляли кряква, красноглазый нырок, хохлатая чернеть, лысуха, чайки озёрная, сизая, хохотунья (*Larus cachinnans* (Pallas, 1811)) и средиземноморская. Суммарная численность лысухи и озёрной чайки составила в среднем 560 особей или 57,3% общей численности птиц в декабре – январе 2019–2020 гг. В феврале часть зимовавших видов покидает бухту, тогда как птицы из южных регионов прибывают в большем количестве, чем улетевшие, задерживаясь на 1–3 недели. Численность птиц существенно снижается от начала весны к лету, её минимум отмечен с мая до июля (рис. 2).

В зимний период в вершинной части бухты сосредоточено до 80% птиц, что связано с защищённостью этой акватории от штормов, наличием зарослей тростника (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.), которые являются местом укрытия, кормёжки и гнездования для водоплавающих и околоводных птиц. В целом, высокая концентрация птиц, мигрирующих с севера Крыма и из континентальных районов, связана с наличием в бухте обширных мелководий и кормовой базы (обилие мелких рыб, бентоса, особенно полихет). Большое значение имеет и подкормка, осуществляемая горожанами, особенно для лебедя-шипуна (*Cygnus olor* (Gmelin, 1789)).

В составе орнитофауны выявлено 11 видов с охранным статусом разного уровня – регионального [25] и (или) федерального (приведены в Приказе Минприроды России от 24.03.2020 № 162 «Об утверждении Перечня объектов животного мира, занесённых в Красную книгу Российской Федерации»): малый лебедь (*Cygnus bewickii* Yarrell, 1830), серый гусь (*Anser anser* (Linnaeus, 1758)), краснозобая казарка (*Branta ruficollis* (Pallas, 1769)), белоглазый нырок (*Aythya nyroca* (Gueldenstaedt, 1770)), савка (*Oxyura leucocephala* (Scopoli, 1769)), чернозобая гагара (*Gavia arctica* (Linnaeus, 1758)), розовый пеликан (*Pelecanus onocrotalus* Linnaeus, 1758), красношейная поганка (*Podiceps auritus* (Linnaeus, 1758)), средиземноморский хохлатый баклан (*Phalacrocorax aristotelis* (Linnaeus, 1761)), перевозчик (*Actitis hypoleucos* (Linnaeus, 1758)) и клуша (*Larus fuscus* Linnaeus, 1758). Кроме перевозчика, имеющего только региональный охранный статус, остальные 10 видов охраняются на федеральном уровне или имеют совмещённый статус.

Ихтиофауна. В акватории встречается 60 видов рыб из 45 родов, 31 семейства и 13 от-

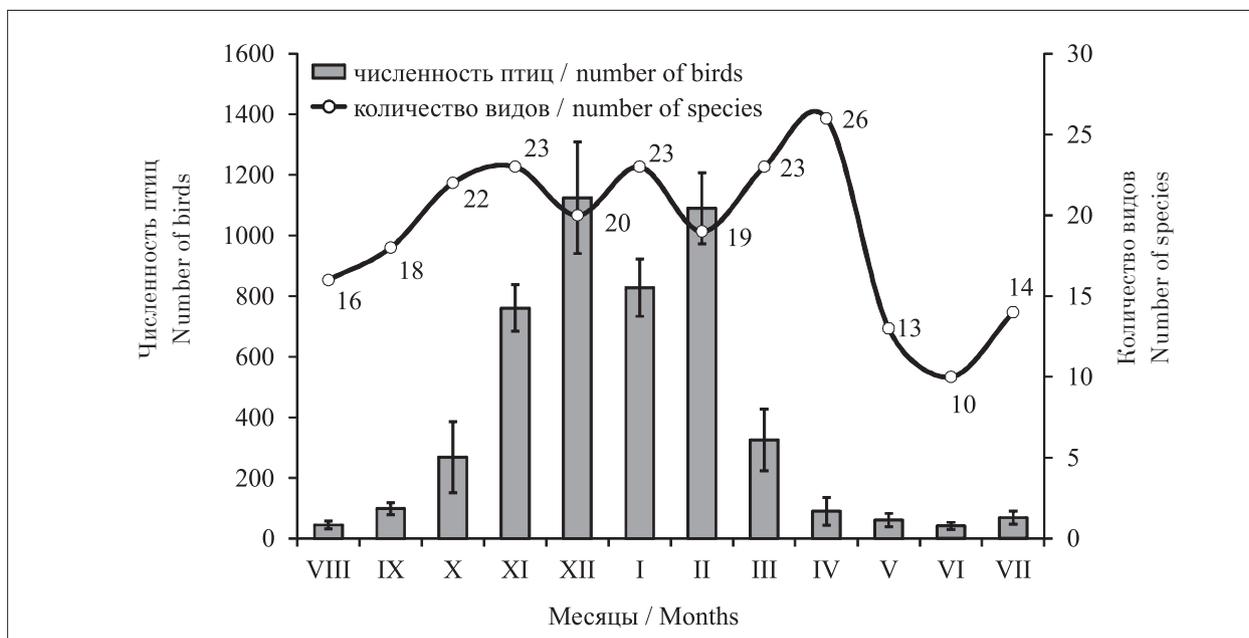


Рис. 2. Изменение количества видов и особей птиц в бухте Круглой в течение года (август 2019 г. – июль 2020 г.)
Fig. 2. The annual changes in the number of bird species and individuals in the Kruglaya Bay (from August, 2019 to July, 2020)

рядов. Половина их общего количества приходится на долю представителей семейств Gobiidae, Blenniidae, Labridae, Syngnathidae и Sparidae. Большинство видов являются оседлыми, доля мигрантов не превышает 16%. Максимальное разнообразие ихтиофауны (44 вида) характерно для прибрежного биотопа твёрдых субстратов с сообществом многолетних бурых водорослей. Для песчаного биотопа с преобладанием морских трав, типичного для вершины и центральной части, описано 16 видов. Ихтиоцены этих биотопов представлены в основном донно-придонными осёдлыми видами. К охраняемым на региональном уровне относятся 2 вида [25].

Макрофитобентос. Флора макрофитов насчитывает 41 вид, из которых 8 – зелёных Chlorophyta, 13 – бурых Ochrophyta и 14 – красных Rhodophyta водорослей, а также 6 видов высших растений (морских трав). Наибольшее развитие выявлено у *Ericaria crinita* (Duby) Molinari & Guiry, *Gongolaria barbata* (Stackhouse) Kuntze, *Phyllophora crispa* (Huds.) P.S. Dixon. и *Zostera noltei* Horneman. Общие запасы макрофитов оцениваются в 535 т, из них более 90% сосредоточено на глубинах 0,5–5 м. На долю морских трав, бурых, красных и зелёных водорослей приходится 19, 69, 11 и 1% запасов макрофитов соответственно. К охраняемым относятся 4 вида [25], в том числе один вид на федеральном уровне [26].

Макрозообентос. Фауна беспозвоночных включает 124 вида, из них 24 вида Polychaeta, 64 – Crustacea и 36 – Mollusca (17 видов брюхоногих и 19 – двустворчатых моллюсков) [4, 15–19]. Средняя плотность зообентоса на разных участках варьирует от 2241 до 13517 экз./м², биомасса – от 64,6 до 379,1 г/м². Наиболее высокие значения этих показателей характерны для моллюсков, в том числе *Abra segmentum* (Recluz, 1843), *Cerastoderma glaucum* (Bruguire, 1789) и *Hydrobia acuta* (Draparnaud, 1805). Среди Polychaeta наибольшее обилие выявлено у *Capitella capitata* (Fabricius, 1780) и *Hediste diversicolor* (O.F. Mller, 1776) [17, 18], среди Crustacea – у *Diogenes pugilator* Roux, 1828; *Caprella acanthifera* Leach, 1814; *Siphonocetes dellavallei* Stebbing, 1899; *Microdeutopus gryllotalpa* Costa 1853 и *Idotea baltica basteri* Audouin, 1827 [4], при этом у Decapoda высокая встречаемость характерна для *Palaemon elegans* Rathke, 1836 и *Xantho poressa* Olivi, 1792 [16].

Эпифитон массовых видов макрофитов представлен 43 видами [15], из них 8 видов относится к Polychaeta, 23 – Crustacea и 11 – Mollusca. Развитие эпифитона наиболее выражено в сообществах многолетних бурых водорослей, где численность и биомасса моллюсков достигали 5500 экз./кг и 60 г/кг, а ракообразных – 18030 экз./кг и 4,6 г/кг соответственно [15], среди моллюсков преобладали предста-

вители Gastropoda – *Rissoa splendida* Eichwald, 1830 и *Bittium reticulatum* (da Costa, 1778) [19]. К охраняемым на региональном уровне [25] беспозвоночным животным относятся 7 видов ракообразных.

Флора и растительность берегов. Распространены прибрежные (класс Crithmo-Staticetea Br.-Bl. in Br.-Bl. et al. 1952), галофитные (*Juncetea maritimi* Br.-Bl. in Br.-Bl. et al. 1952, *Phragmito-Magnocaricetea* Klika in Klika et Nov k 1941) и степные (*Festuco-Brometea* Br.-Bl. et Tx. ex So 1947) сообщества [27]. Состояние фитоценозов прибрежной зоны варьирует от естественного и удовлетворительного до сильно нарушенного, однако их способность к восстановлению сохранена. В составе флоры выявлено более 100 видов сосудистых растений, наибольшее разнообразие характерно для петрофитных степей. К охраняемым относится 13 таксонов [25, 26].

Природоохранная значимость экосистемы бухты Круглой. Крупные регулярные и сезонные скопления гидрофильных птиц, разнообразие биоты и биоресурсов, наличие многих охраняемых видов (13 видов гидробионтов и 11 видов птиц) и биотопов свидетельствуют о высокой природоохранной ценности, исследуемой аквальной экосистемы. На этом основании нами рекомендовано создание в акватории бухты орнитологического заказника государственного значения «Бухта Круглая», где максимальная численность птиц достигает 1100 особей (рис. 2). Хотя в других особо охраняемых природных территориях (ООПТ), созданных в Крыму для сохранения гидрофильной орнитофауны, эти показатели в несколько раз выше (государственный природный заповедник «Лебяжий остров» (9612 га) и государственный орнитологический заказник «Астанинские плавни» (50 га) на севере и востоке полуострова соответственно), однако разнообразие охраняемых видов птиц в них сопоставимо, что позволяет отнести новый заповедный объект в бухте Круглая к их крупнейшему резервату на юге полуострова (около 60 га).

Формирование ООПТ будет способствовать сохранению мест гнездования птиц, биоценозов ключевых и охраняемых видов, в том числе в береговой зоне, позволит ввести некоторые ограничения на добычу биоресурсов (несанкционированный покос тростника, браконьерский промысел морского червя нереиса, лов рыбы крючковой снастью) для сохранения кормовой базы птиц и снижения фактора беспокойства. В границах перспективного орнитологического заказника целе-

сообразно ввести временный режим охраны на период максимального скопления птиц (1 ноября – 31 марта). В соответствии с природоохранным законодательством РФ (№ 33-ФЗ «Об особо охраняемых природных территориях» от 14.03.1995 г.) такой режим охраны может быть введён для государственных природных заказников. Создание новой ООПТ будет направлено на развитие экологического туризма, экологического воспитания и просвещения, включая наблюдение за птицами (bird-watching), особенно в период их зимовки. Учитывая, что часть прибрежной территории бухты уже отнесена к перспективным заповедным объектам (памятник природы «Фисташки бухты Круглая», Закон № 544-ЗС от 9.09.2019 г. «Об утверждении перечня перспективных особо охраняемых природных территорий регионального значения города Севастополя») и в её береговой зоне и акватории находятся объекты культурного наследия (хора или сельскохозяйственная зона античного полиса Херсонеса и участок его культурного слоя на отмели), то формирование в дальнейшем комплексного ООПТ обеспечит повышение репрезентативности природоохранной сети г. Севастополя.

Заключение

На основе проведённых исследований установлено, что природные комплексы б. Круглой, в том числе зимний гидрофильный орнитокомплекс, характеризуются высоким биологическим разнообразием. Охранный статус имеют 37 видов, из них 11 представителей орнитофауны. Рекомендовано создание государственного орнитологического заказника с временным режимом охраны, первого из подобных в Севастополе и Крыму, для сохранения ценных природных комплексов, экологического воспитания и просвещения, развития экологического и научного туризма.

Работа выполнена в рамках Госзадания ФИЦ ИнБИОМ № гос. регистрации 121030100028-0.

Литература

1. Зернов С.А. К вопросу об изучении жизни Чёрного моря // Записки Императорской Академии наук по физико-математическому отделению. СПб.: Типография Академии наук, 1913. Т. 32. № 1. 299 с.
2. Болтачёв А.Р., Карпова Е.П. Морские рыбы Крымского полуострова. Симферополь: «Бизнес Информ», 2012. 200 с.

3. Ковардаков С.А., Празукин А.В. Структурно-функциональные характеристики донного фитоценоза бухты Круглой (Севастополь) // Экосистемы, их оптимизация и охрана. 2012. № 7. С. 138–148.

4. Ревков Н.К., Бондаренко Л.В., Гринцов В.А. Структура таксоцено Malacostraca акватории бухты Круглой (юго-западный Крым, Чёрное море) // Экология моря. 2008. Вып. 75. С. 71–76.

5. Бескаравайный М.М. Птицы морских берегов южного Крыма. Симферополь: Н. Орианда, 2008. 160 с.

6. Гиригосов В.Е., Бескаравайный М.М. Сезонная динамика гидрофильного орнитокомплекса бухты Круглая (Севастополь, Чёрное море) // Морской биологический журнал. 2016. Т. 1. № 4. С. 12–21.

7. Логачев В.С., Мордвинов Ю.Е. Видовой состав, динамика численности и характер распределения водлюбивых птиц в районе г. Севастополя // Сезонные миграции птиц на территории Украины. Киев: Наукова думка, 1992. С. 158–164.

8. Мордвинов Ю.Е. Мониторинг видового разнообразия и динамики численности гидрофильных птиц на зимовке в бухтах г. Севастополя в 1999/2000 гг. // Зимние учёты птиц на Азово-Черноморском побережье Украины. Вып. 3. Одесса; Киев: Wetlands International, 2001. С. 51–55.

9. Комплексная программа охраны окружающей природной среды, рационального использования природных ресурсов и экологической безопасности г. Севастополя на период до 2010 г. Заключительный отчёт по договору 2000/7 Океанологического центра НАН Украины. Севастополь, 2001. 290 с.

10. Губанов В.И., Куфтаркова Е.А., Ковригина Н.П., Родионова Н.Ю. Диагноз качества вод Чёрного моря в районе г. Севастополя // Современные проблемы экологии Азово-Черноморского региона: Материалы III Международной конференции. Керчь: ЮгНИРО, 2008. С. 90–97.

11. Вергелес Ю.И. Количественные учёты населения птиц: обзор современных методов // Беркут. 1994. Т. 3. Вып. 1. С. 43–48.

12. Правдин И.Ф. Руководство по изучению рыб. М.: Пищевая промышленность, 1966. 376 с.

13. Калугина-Гутник А.А. Фитобентос Чёрного моря. Киев: Наукова думка, 1975. 248 с.

14. Голубев В.Н., Корженевский В.В. Методические рекомендации по геоботаническому изучению и классификации растительности Крыма. Ялта: ГНБС, 1985. 37 с.

15. Макаров М.В., Бондаренко Л.В., Копий В.Г. Эпифитон макрофитов бухты Круглая (Юго-Западный Крым, Чёрное море) // Биоразнообразии и роль животных в экосистемах: Материалы VI Международной научной конференции. Днепропетровск: Издательство ДНУ, 2011. С. 97–99.

16. Тимофеев В.А., Аносов С.Е. Современное состояние видового разнообразия Decapoda (Crustacea) в бухтах Севастополя // Морские биологические исследо-

вания: достижения и перспективы: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2016. С. 174–177.

17. Алёмов С.В., Витер Т.В. Сообщества макрозообентоса вершины б. Круглая (Севастополь, Чёрное море) // Экологические проблемы Азово-Черноморского региона и комплексное управление прибрежной зоной: Материалы молодёжной научно-практической конференции. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. С. 10–12.

18. Копий В.Г. Макрозообентос в прибрежной зоне бухт Севастополя (Крымское побережье Чёрного моря) // Морской экологический журнал. 2011. Отдельный вып. № 2. С. 43–48.

19. Макаров М.В., Копий В.Г., Бондаренко Л.В., Витер Т.В., Подзорова Д.В. Макрозообентос зарослей водорослей *Cystoseira crinita* Duby, 1830 у берегов Крыма и Кавказа (Чёрное море) // Учёные записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского Биология. Химия. 2020. Т. 6 (72). № 3. С. 97–116.

20. Коблик Е.А., Архипов В.Ю. Фауна птиц стран Северной Евразии в границах бывшего СССР: списки видов. Зоологические исследования. № 14. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2014. 171 с.

21. FishBase. 2021 / Eds. R. Froese, D. Pauly. World Wide Web electronic publication [Электронный ресурс] www.fishbase.org, version (02/2021) (Дата обращения: 06.07.2021).

22. Guiry M.D., Guiry G.M. AlgaeBase. 2021. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway [Электронный ресурс] <http://www.algaebase.org> (Дата обращения: 06.07.2021).

23. Euro+Med PlantBase: The information resource for Euro-Mediterranean plant diversity. 2005–2021 [Электронный ресурс] <http://www.emplantbase.org/home.html> (Дата обращения: 04.06.2021).

24. Vegetation of Europe. Hierarchical floristic classification system of vascular plant, bryophyte, lichen, and algal communities [Электронный ресурс] <https://www.synbiosys.alterra.nl/evc/> (Дата обращения: 04.06.2021).

25. Красная книга города Севастополя / Под ред. И.В. Довгаль, В.В. Коржеевского. Калининград: Издательский дом «РОСТДОАФКЛ», 2018. 432 с.

26. Красная книга Российской Федерации (растения и грибы) / Под ред. Р.В. Камелина, В.С. Новикова. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2008. 885 с.

27. Бондарева Л.В. Растительность прибрежной зоны Гераклеийского полуострова // Биология растений и садоводство: теория, инновации. 2019. Т. 149. С. 41–54.

References

1. Zernov S.A. On the study of the life of the Black Sea // Notes of the Imperial Academy of Sciences for the

Physics and Mathematics Department. Sankt-Peterburg: Tipografiya Akademii nauk, 1913. V. 32. No. 1. 299 p. (in Russian).

2. Boltachev A.R., Karpova E.P. Marine fish of the Crimean peninsula. Simferopol: Biznes Inform, 2012. 200 p. (in Russian).

3. Kovardakov S.A., Prazukin A.V. Structural and functional characteristics of the bottom seaweeds community in Kruglaya Bay (Sevastopol) // Ekosistemy, ikh optimizatsiya i okhrana. 2012. No. 7. P. 138–148 (in Russian).

4. Revkov N.K., Bondarenko L.V., Grintsov V.A. The structure of the Malacostraca taxocene at Kruglaya Bay (south-western Crimea, Black Sea) // Ekologiya morya. 2008. No. 75. P. 71–76 (in Russian).

5. Beskaravaynyy M.M. Birds of the sea shores of the southern Crimea. Simferopol: N. Orianda, 2008. 160 p. (in Russian).

6. Giragosov V.E., Beskaravaynyy M.M. Seasonal dynamics of the hydrophilic bird community of Kruglaya Bay (Sevastopol, the Black Sea) // Marine Biological Journal. 2016. V. 1. No. 4. P. 12–21 (in Russian). doi: 10.21072/mbj.2016.01.4.02

7. Logachev V.S., Mordvinov Yu.E. The check-list, population dynamics and distribution characteristics of water-loving birds in vicinities of Sebastopol. In: Seasonal migrations of birds on the territory of Ukraine. Kiev: Naukova dumka, 1992. P. 158–164 (in Russian).

8. Mordvinov Yu.E. Monitoring of species diversity and dynamics of the number of hydrophilic birds overwintering in the bays of Sevastopol in 1999/2000 // Winter counts of birds on the Azov-Black Sea coast of Ukraine. Odessa; Kiev: Wetlands International, 2001. No. 3. P. 51–55 (in Russian).

9. Comprehensive program for environmental protection, rational use of natural resources and ecological safety of the city of Sevastopol for the period up to 2010. Final report on the agreement 2000/7 of the Oceanological Center of the National Academy of Sciences of Ukraine. Sevastopol, 2001. 290 p. (in Russian).

10. Gubanov V.I., Kuftarkova E.A., Kovrigina N.P., Rodionova N.Yu. Diagnosis of the Black Sea water quality in the area of Sevastopol // Modern problems of ecology of the Azov-Black Sea region: Materialy III Mezhdunarodnoy konferentsii. Kerch: YugNIRO, 2008. P. 90–97 (in Russian).

11. Vergeles Yu.I. Quantitative Census of Bird Populations: Review of Modern Methods // Berkut. 1994. V. 3. No. 1. P. 43–48 (in Russian).

12. Pravdin I.F. Guide to the study of fish. Moskva: Pishchevaya promyshlennost, 1966. 376 p. (in Russian).

13. Kalugina-Gutnik A.A. Phytobenthos of the Black Sea. Kiev: Naukova dumka, 1975. 248 p. (in Russian).

14. Golubev V.N., Korzhenevsky V.V. Methodical recommendations for geobotanical study and classification of Crimean vegetation. Yalta: GNBS, 1985. 37 p. (in Russian).

15. Makarov M.V., Bondarenko L.V., Kopy V.G. Epiphyton of Macrophytes of Kruglaya Bay (South-West Crimea, Black Sea) // Biodiversity and the role of animals

in ecosystems: Materialy VI Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. Dnepropetrovsk: Izdatelstvo DNU, 2011. P. 97–99 (in Russian).

16. Timofeev V.A., Anosov S.E. The current state of the species diversity of Decapoda (Crustacea) in the bays of Sevastopol // Marine biological research: achievements and prospects: Sbornik materialov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2016. P. 174–177 (in Russian).

17. Alyomov S.V., Viter T.V. Macrozoobenthos communities on the top of Kruglaya Bay (Sevastopol, Black Sea) // Environmental problems of the Azov-Black Sea region and integrated management of the coastal zone: Materialy molo-dezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2014. P. 10–12 (in Russian).

18. Kopy V.G. Macrozoobenthos in the coastal zone of Sevastopol bays (Crimean Black Sea near-shore) // Morskoy ekologicheskiy zhurnal. 2011. Separate No. 2. P. 43–48 (in Russian).

19. Makarov M.V., Kopy V.G., Bondarenko L.V., Viter T.V., Podzorova D.V. Macrozoobenthos in the epiphyton of algae *Cystoseira crinita* Duby, 1830 near the coast of Crimea and the Caucasus (Black Sea) // Uchenye zapiski Krymskogo federalnogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo Biologiya. Khimiya. 2020. V. 6 (72). No. 3. P. 97–116 (in Russian). doi: 10.37279/2413-1725-2020-6-3-97-116

20. Koblik E.A., Arkhipov V.Yu. Avifauna of the States of Northern Eurasia (former USSR): Checklists. Zoologicheskie issledovaniya, No. 14. Moskva: Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2014. 171 p. (in Russian).

21. FishBase. 2021 / Eds. R. Froese, D. Pauly. World Wide Web electronic publication [Internet resource] www.fishbase.org, version (02/2021) (Accessed: 06.07.2021).

22. Guiry M.D., Guiry G.M. AlgaeBase. 2021. Worldwide electronic publication, National University of Ireland, Galway [Internet resource] http://www.algaebase.org (Accessed: 06.07.2021).

23. Euro + Med PlantBase: The information resource for Euro-Mediterranean plant diversity. 2005–2021 [Internet resource] http://www.emplantbase.org/home.html (Accessed: 04.06.2021).

24. Vegetation of Europe. Hierarchical floristic classification system of vascular plant, bryophyte, lichen, and algal communities [Internet resource] https://www.synbiosys.alterra.nl/evc/ (Accessed: 04.06.2021).

25. Red Data Book of the city of Sevastopol / Eds. I.V. Dovgal, V.V. Korzhenevskiy. Kaliningrad: Izdatelskiy dom “ROSTDOAFKL”, 2018. 432 p. (in Russian).

26. Red Data Book of the Russian Federation (plants and mushrooms) / Eds. R.V. Kamelin, V.S. Novikov. Moskva: Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2008. 885 p. (in Russian).

27. Bondareva L.V. Vegetation of the coastal zone of the Heracleisky peninsula // Plant Biology and Horticulture: theory, innovation. 2019. V. 149. P. 41–54 (in Russian). doi: 10.36305/0201-7997-2019-149-41-54

Дальние перемещения мелких млекопитающих в осенне-зимний период

© 2023. Е. Б. Григоркина, к. б. н., с. н. с.,

Г. В. Оленев, д. б. н., зав. лабораторией,

Институт экологии растений и животных Уральского отделения РАН,

620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 202,

e-mail: grigorkina@ipae.uran.ru, olenev@ipae.uran.ru

Впервые в зоне Восточно-Уральского радиоактивного следа – ВУРС (Челябинская область, Южный Урал) на мелких млекопитающих из природной популяции показана реальная возможность выявления особей с родаминовой меткой, полученной в предыдущем году. Цель работы – оценить дальние дисперсии мелких млекопитающих в осенне-зимний период, используя методику группового мечения родамином В (RB). Однократное поедание приманки обеспечивает системную (волосы, когти, вибриссы) метку. Зафиксированный срок сохранения метки для малой лесной мыши (*Sylvaemus uralensis* Pallas, 1811) составил 338 сут, для обыкновенной бурозубки (*Sorex araneus* Linnaeus, 1758) – 312 сут, для красной полёвки (*Myodes rutilus* Pallas, 1779) – 251 сут. Это позволило впервые оценить дальние дисперсии зимовавших особей в осенне-зимний период из зоны ВУРС на сопредельные территории и наоборот. Выяснилось, что *S. uralensis* способны расселяться на расстояние до 10800 м, *M. rutilus* – 9500 м, *S. araneus* – 9300 м, что является максимально зарегистрированными из известных дистанций для данных видов. Выявлено преобладание самок, как у зимовавших осёдлых животных, так и у дальних мигрантов. Возможно, расселение самок является эволюционно более выгодным для популяции, поскольку они служат потенциальным резервуаром генетического разнообразия. Наличие дальних мигрантов обеспечивает пространственную и функциональную связанность населения и указывает на возможность обмена генетической информацией между популяционными группировками импактной и прилежащих территорий. Методика группового мечения родамином показала свою эффективность при исследовании пространственных перемещений особей в осенне-зимний период. Её целесообразно включить в систему мониторинговых исследований в зонах локальных техногенных загрязнений, а также использовать для калибровки выборки животных при изучении отдалённых последствий радиационного и других токсических воздействий.

Ключевые слова: Восточно-Уральский радиоактивный след, групповое мечение, мелкие млекопитающие, дисперсия, осенне-зимний период.

Long-distance movements of small mammals during the autumn-winter period

© 2023. E. B. Grigorkina ORCID: 0000-0002-8797-6211,

G. V. Olenev ORCID: 0000-0002-8896-7915,

Institute of Plant and Animal Ecology of the Ural Branch

of the Russian Academy of Sciences,

202, 8 Marta St., Yekaterinburg, Russia, 620144,

e-mail: grigorkina@ipae.uran.ru, olenev@ipae.uran.ru

First time in the East Urals radioactive trace zone (EURT) (Chelyabinsk region, Southern Urals) small mammals from natural population with rhodamine B (RB) label, received in last year were revealed. The aim of this study was to estimate long-distance movements (LDM) of small mammals during the autumn–winter season by method of group marking with bait containing RB. One-time ingestion of bait with RB ensures systemic marking, which fixed in keratin-containing structures (hairs, claws, vibrissae). Retention time of RB-label for wood mouse (*Sylvaemus uralensis* Pallas, 1811) was 338 days, for common shrew (*Sorex araneus* Linnaeus, 1758) – 312 days, for red-backed vole (*Myodes rutilus* Pallas, 1779) – 251 days. It has allowed for the first time to estimate LDM of wintering individuals during autumn–winter season from EURT zone to adjacent territories and vice versa. It was found that *S. uralensis* are able to settle within 10800 m, *M. rutilus* – 9500 m, *S. araneus* – 9300 m. These data are the maximum recorded distance for these species. There is a predominance of females both among wintering settled animals and distant migrants. Probably LDM

of females is evolutionary more favorable to population as they serve as the potential reserve of a genetic variety. LDM provides spatial and functional connectivity of mouse-sized mammal's populations and possibility of genetic information exchange between population groupings on both the impact and background territories. The technique of group marking with bait containing RB has shown the efficiency at research of spatial structure of small mammals during the autumn-winter period. It is advisable to include it in monitoring system in areas of local technogenic pollution as well as to use it to calibrate samples of animals in the study of remote effects of radiating and other toxic effects.

Keywords: East Urals radioactive trace zone, group marking, small mammals, dispersal, autumn-winter period.

Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС) – результат Кыштымской радиационной аварии (1957 г.) на Южном Урале. Авария произошла на ядерном предприятии ПО «Маяк» в результате взрыва ёмкости-хранилища радиоактивных отходов, что привело к загрязнению продуктами деления промышленной площадки г. Озёрска, части территории Челябинской и Свердловской областей. В головной части следа был создан Восточно-Уральский радиационный заповедник. Площадь загрязнения составила 1000 км² в границах плотности загрязнения ⁹⁰Sr 2 Ки/км² (74 кБк/м²), принятой в качестве критерия необходимости принятия мер радиационной защиты населения [1]. Зона ВУРС выделяется особенностями конфигурации (рис. 1), которую определили погодные условия в момент инцидента. Максимальные уровни загрязнения плавно снижались вдоль оси следа по мере удаления от источника аварии и достаточно резко падали в обоих поперечных направлениях. Поэтому загрязнённой оказалась вытянутая узкая территория с резко снижающимся градиентом загрязнения [2]. Территорию ВУРС населяют многие животные, в том числе мелкие млекопитающие. Специфика конфигурации зоны ВУРС не препятствует свободному перемещению и обмену животных в любых направлениях, в том числе в поперечном. Фоновым видам грызунов и насекомоядных свойственна высокая миграционная активность (дисперсии), лабильные типы пространственной структуры [3, 4]. Суточные перемещения мелких грызунов достигают 3000 м [5, 6]. Ночная дистанция модельного вида в зоне влияния ВУРС – малой лесной мыши (*Sylvaemus uralensis* Pallas, 1811) может составлять 1500 м [7].

Для населения позвоночных животных в зонах локального техногенного загрязнения учёт миграций/дисперсий имеет принципиальное значение, поскольку напрямую касается изучения биологических эффектов. В данном случае это радиационное воздействие. Миграции влияют на время пребывания животных в зоне загрязнения, в итоге определяя размах аккумуляции в организме

техногенных поллютантов, увеличивают вариабельность биологических показателей [8–10]. Следствиями дисперсий может быть также перенос повреждённых генов и, соответственно, радиационно-индуцированных эффектов на сопредельные территории [11–13]. Поэтому актуальной проблемой при изучении биологических эффектов является учёт миграционного фактора в целом, а также с целью разделения животных на адекватные выборки, «грязных» – из зоны ВУРС и «чистых» – с контрольных участков.

Миграционные процессы – неотъемлемая составляющая функционирования популяций, имеющая место и в зонах локального техногенного загрязнения. Однако до настоящего времени значение этого важнейшего популяционного процесса в радиоэкологических исследованиях не учитывается, работ подобного рода в мире мало, что в значительной степени связано с методическими трудностями. Преодолеть их позволяет методика группового, неинвазивного мечения мелких млекопитающих красителем родамином В (RB) с последующим отслеживанием их в пространстве и во времени. В организме животных RB связывается со структурами, являющимися дериватами кожи, содержащими кератин (шерсть, вибриссы, когти) [14]. Используемая методика [15] достаточно проста, эффективна и позволяет пометить практически всё животное население на определённом пространстве и отследить любые (ближние и дальние) перемещения в течение достаточно длительного времени.

Цель работы – оценить дальние дисперсии мелких млекопитающих в осенне-зимний период, используя методику группового мечения родамином В.

Объекты и методы исследования

Объекты исследования – грызуны и насекомоядные, населяющие зону влияния ВУРС и сопредельные территории. Материал собран в ходе полевых работ (период 2018–2022 гг.) при проведении мечения животного населения RB и контрольных отловов на разноудалённых участках. Мечение, приготовление приманки

и детекция метки по жёлтой флуоресценции выполнены согласно [15]. Даже однократное поедание приманки с RB даёт чёткую системную (фиксированную в ткани) метку, которая длительно сохраняется, надёжно выявляется, а также передаётся детенышам с молоком. Детекция самопомеченного зверька осуществляется по свечению упоминавшихся выше производных кожи при детальном осмотре всей поверхности тела, что позволяет достаточно быстро обследовать массовый материал, в том числе в полевых условиях [16].

Мечение проводили в разные годы в августе или сентябре либо на периферии зоны ВУРС (рис. 1, участок 2), либо на контрольном участке (уч. 4), расстояние между ними составляет 9300 м. Приманку с красителем равномерно раскладывали в сухую погоду на площадке размером 1 га. На один эксперимент использовано 5 кг приманки и 800 мг/кг RB. Первое мечение выполнено в сентябре 2017 г. Характеристика исследуемых участков и уровни их загрязнения приведены в наших предыдущих работах [12, 17].

Контрольные отловы проводили в период с апреля по октябрь (5–6 раз за сезон) давилками методом безвозвратного изъятия на участках, расположенных на разном удалении от площадки мечения (рис. 1): уч. 1 – эпицентр ВУРС (1500 м); уч. 3 – через автомагистраль, за пределами радиационного заповедника (800 м); уч. 4 – контроль (9300 м). В качестве дополнительного использован участок, на-

ходящийся через дорогу в 200 м от контрольного в прибрежной зоне оз. Кожаккуль. Для оценки доли резидентов были задействованы обе площадки мечения (уч. 2, 4). При выборе мест отловов учитывали барьерную роль озёр – ландшафтных препятствий, локально увеличивающих плотность животных и шансы поимки меченых зверьков. На каждой площадке за одну отловочную сессию устанавливали по 20–40 ловушек на дистанции 10 м на 1 сутки, что обусловлено конфигурацией полигона и многолетней схемой отлова [17]. У добытых животных определяли вид, пол, функциональное состояние.

Результаты и обсуждение

Согласно протоколу [15] системная метка, указывающая на поступление биомаркера с кормом, хорошо видна в вибриссах, когтях, шерсти вентральной поверхности тела. При этом площадь светящихся участков шерсти не превышает половины поверхности тела и проявляется в случайных местах.

В период 2018–2022 гг. отловлено 86 меченых мелких млекопитающих 6 видов: малая лесная мышь (*Sylvaemus uralensis* Pallas, 1811), полевая мышь (*Apodemus agrarius* Pallas, 1771), красная полёвка (*Myodes rutilus* Pallas, 1779), полёвка-экономка (*Microtus oeconomus* Pallas, 1776), обыкновенная полёвка (*Microtus arvalis* Pallas, 1778), обыкновенная бурозубка (*Sorex araneus* Linnaeus,

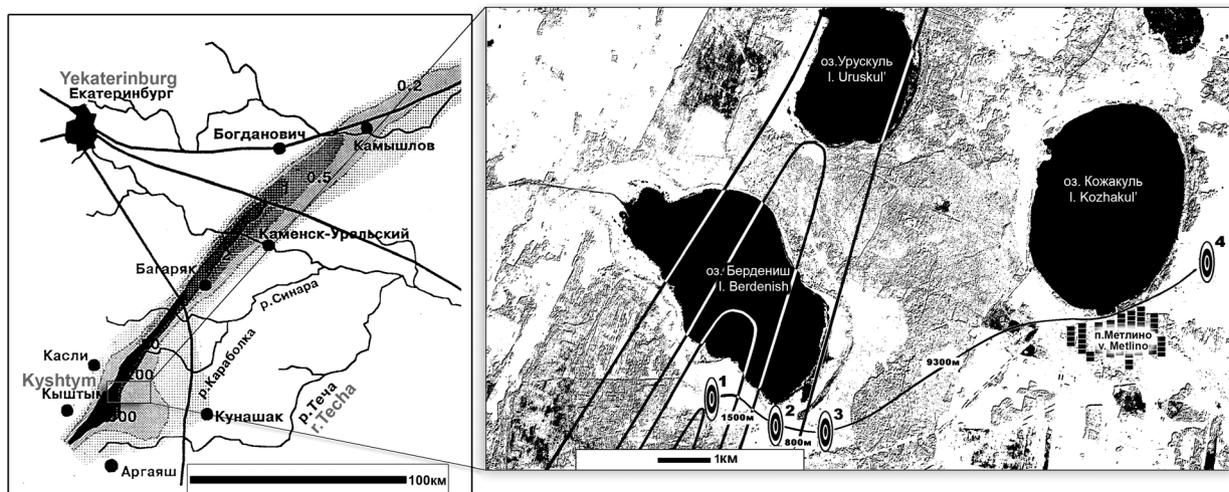


Рис. 1. Карта-схема Восточно-Уральского радиоактивного следа (Челябинская область, Южный Урал). На выделенном фрагменте карты показаны участки мечения (№ 2, 4) и отловов (№ 1–4) мелких млекопитающих на импактной (ВУРС) и фоновой территориях. Цифрами отмечены расстояния от площадки мечения (№ 2), изолиниями – градиент радиоактивного загрязнения

Fig. 1. Schematic map of Eastern Urals radioactive trace zone (Chelyabinsk Region, Southern Urals). The highlighted fragment of the map shows the marking (No. 2, 4) and capture (No. 1–4) plots of small mammals in the impact (EURT) and background territories. Digits indicate distances from the tagging area (No. 2), isolines – gradient of radioactive contamination

Таблица 1 / Table 1

Доля видов (%), составляющих биотическое сообщество на участках ВУРС-контроль (2018–2022 гг.) / Share of biotic community species (%) at EURT-control sites (2018–2022)

Год / Year		2022		2021		2020		2019		2018	
Участок / Site		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Вид Species	<i>S. uralensis</i>	70	49	90	54	52	67	44	52	72	83
	<i>M. rutilus</i>	7	32	2	20	–	–	3	5	–	6
	<i>S. araneus</i>	23	19	8	8	25	12	15	29	–	–
	<i>Microtus</i> sp.	–	–	–	18	9	4	8	2	–	5
	<i>A. agrarius</i>	–	–	–	–	14	17	30	12	28	6

Примечание: 1 – ВУРС, 2 – контроль. Прочерком обозначено отсутствие особей в отловах.
Note: 1 – EURT, 2 – control. The dash indicates no specimens in the capture.

1758). В целом группа меченых животных отражает соотношение видов в уловах, где первое место по численности в течение всего периода проведения радиоэкологического мониторинга (2002–2022 гг.) принадлежит *S. uralensis* – абсолютный доминант в биотическом сообществе [17].

Отметим, что до 2009 г. *S. uralensis* составляла 40–60% всех уловов. Великая Восточно-Европейская засуха 2010 г. [18] выявила неоднозначный отклик разных видов на экстремальное климатическое воздействие. Сообщество грызунов в зоне влияния ВУРС из поливидового (10 видов) превратилось в монодоминантное, и несколько лет было представлено исключительно *S. uralensis* [19]. Согласно геоботаническому районированию, ВУРС расположен в пределах Зауральского пене-плена в лесостепной зоне Южно-Зауральской провинции [20]. Аридизация среды обитания в лесостепной зоне Урала оказалась экологически благоприятной для *S. uralensis*, что свидетельствует об её наибольшей устойчивости и толерантности к засушливому климату. Для других видов грызунов (красные, серые, водяные полёвки и бурузубки) засуха явилась лимитирующим фактором и привела к их исчезновению из биоценоза на длительное время [19]. В годы исследований статус доминирующей *S. uralensis* не изменился, доля её в сборах варьировала в широком диапазоне на анализируемых участках, достигая в зоне ВУРС 90% (табл. 1). Долевое участие других видов нестабильно, они встречаются не ежегодно и характеризуются низкой численностью.

Из общего числа меченых животных (86), 16 особей (19%) трёх видов (*S. uralensis*, *M. rutilus*, *S. araneus*) получили RB-метку осенью предыдущего года. Все они относились к группировке зимовавших: самцы имели развитые семенники и придатки, самки – подсосные пятна, одну или несколько групп плацентарных пятен или зародышей на ранней стадии

развития. Подавляющее большинство меченых особей пришлось на долю *S. uralensis*. Общая характеристика животных, пространственное распределение и направление их перемещений представлены в таблице 2. Из данных таблицы 2 хорошо видно преобладание самок, количество которых превышает в три раза число самцов. Прежде всего, это касается *S. uralensis*, среди которых оказалось 2 самца и 11 самок. Данные литературы о влиянии пола на дальние дисперсии мелких млекопитающих противоречивы, и их крайне мало.

По результатам настоящего исследования можно сделать предположение, что расселение самок на прилежащие территории является эволюционно гораздо более прогрессивным для поддержания разнородности популяции. Прежде всего, только по материнской линии наследуется митохондриальный геном, в то время как отцовская митохондриальная ДНК не оказывает существенного влияния на генотип потомства [21]. Помимо этого, как известно, беременные самки, несущие в детёнышах генетическую информацию от нескольких самцов, обеспечивают лучшую выживаемость, более успешное размножение и приспособленность потомков, а также являются потенциальным резервуаром генетического разнообразия и экологической устойчивости популяции [22–24].

Из общего числа меченых животных одна половина (7 из 16) квалифицированы как дальние мигранты (long-distance movement – LDM), перемещающиеся в обоих направлениях за пределами участка обитания. Из зоны ВУРС на контроль переселились 5 особей (табл. 2). Самец и две самки *S. uralensis*, а также самка *S. araneus* преодолели дистанцию 9300 м. Самец *M. rutilus* был пойман в окрестностях оз. Кожаккуль в берёзовом лесу на рекордном для грызунов этого вида расстоянии 9500 м. В противоположном направлении (контроль-ВУРС) зарегистрирован

Таблица 2 / Table 2

Характеристика и пространственное распределение меченых животных, срок сохранения и локализация метки (2018–2022 гг.)
 Characteristic and spatial distribution of marking animals, retention and localization of RB-label (2018–2022)

№ No.	Дата отлова Capture data	Вид Specie	Пол Sex	Вес, г Weight, g	Статус Status	Направление перемещений особей между участками согласно рисунку 1 Direction of specimens' dispersion between plots according Figure 1	Дистан- ция, м Distanc- e, m	Локализация метки (жёлтое свечение) Localization of RB-label (yellow fluorescence)	Срок, сут Retention, days
1	24.05.2018	<i>Sylvaeus uralensis</i>	♂	27,0	мигрант migrant	2–4	9300	участки свечения по всей длине волоса на шкурке особи / fluorescence along the length of the hair on the skin	240
2		<i>S. uralensis</i>	♀	27,0					240
3	7.08.2018	<i>S. uralensis</i>	♀	25,0				свечящиеся концы волосков fluorescent ends of hairs	310
4	12.06.2020	<i>S. uralensis</i>	♀	24,0	резидент resident	4	–	свечение шерсти на подмышках, в нижней части живота, вокруг уретры, на лапе / fluores- cence of the fur under forepaws, in the lower abdo- men, around the urethra, on the paw	312
5		<i>S. uralensis</i>	♀	25,0					312
6		<i>S. uralensis</i>	♀	23,0					312
7		<i>S. uralensis</i>	♀	28,0	транзиент transient	4–1	10800	слабое свечение одного участка шерсти в сравне- нии с резидентами / weak fluorescence of one area of fur compared to the residents	312
8		<i>Sorex araneus</i>	♀	12,0	резидент resident	4		свечение хвоста / fluorescence of the tail	312
9	8.07.2020	<i>S. uralensis</i>	♀	29,0			–	свечение отдельных волосков на лапе и жи- воте / fluorescence of the separate hairs on the paw and abdomen	338
10	04.04.2021	<i>S. uralensis</i>	♀	22,0			–	свечение шерсти на всех лапах и хвосте fluorescence of fur on all paws and tail	244
11		<i>S. uralensis</i>	♂	23,0			–	свечение пятна на передней лапе, шерсти на обеих задних лапах / fluorescence of stain on a forepaw, fur on both hinder paws	244
12		<i>S. uralensis</i>	♂	24,0			–	свечение овального пятна на груди, полоски на животе и задней лапе fluorescence of oval stain on the breast, strips on abdomen and hinder paw	244

13	14.04.2022	<i>S. uralensis</i>	♀	19,0	резидент resident	2	–	флюоресценция всей поверхности живота fluorescence of entire abdominal surface	210
14		<i>Sorex araneus</i>	♀	–	мигрант migrant	2–4	9300	свечение шерсти на задних лапах, слабая метка на передней лапе / fluorescence of fur on hinder paws, a weak mark on the forepaw	210
15	25.05.2022	<i>S. uralensis</i>	♀	20,0		2–1	1500	свечение шерсти у рта, на всех лапах, отдельных волосков на спине / fluorescence of fur at the mouth, on all paws, separate hairs on the back	251
16		<i>Myodes rutilus</i>	♂	25,0		2–4 + 200 м	9500	свечение шерсти на голове, шее, два симметричных пятна на животе / fluorescence of hair on the head, neck, two symmetric stains on the abdomen	251

Примечание: прочерком обозначены резидентны – оседлые особи, отловленные на площадке мечения (distances are absent).
 Note: The dash indicates residents – settled individuals, caught on the marking plots (distances are absent).

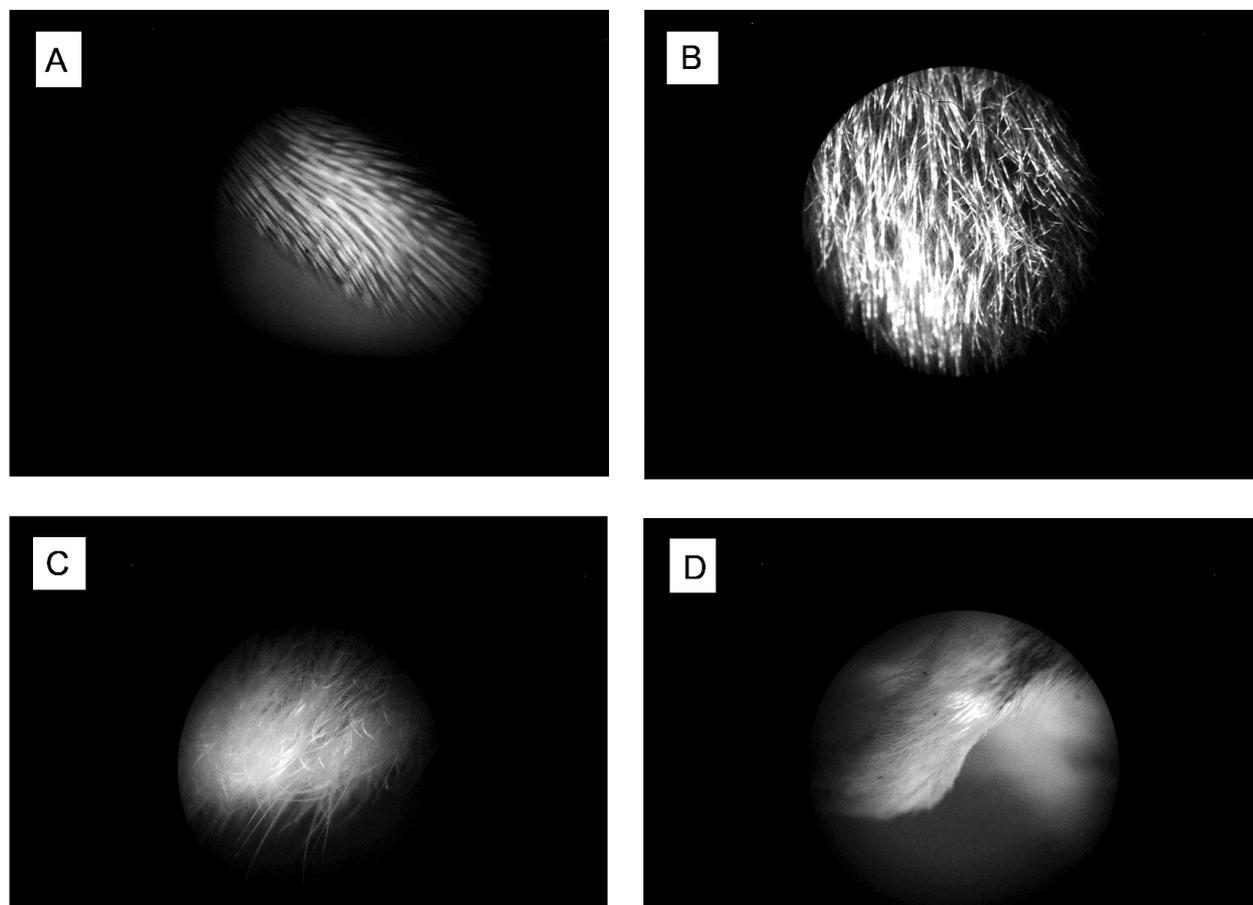


Рис. 2. Иллюстрация системных RB-меток (жёлтое свечение) у зимовавших резидентов и дальних мигрантов. Случайное расположение: А – на хвосте оседлой *S. araneus* (312 сут); В – на голове мигранта *M. rutilus* (251 сут, 9500 м); С – под мышкой транзитной *S. uralensis* (312 сут, 10800 м); D – отдельные волоски на лапе оседлой самки *S. uralensis* (338 сут)
Fig. 2. Examples of systemic RB-labels (yellow fluorescence) in wintered residents and long-distance migrants. Random localization: A – on the tail of resident female *S. araneus* (210 days), B – on the head of disperser male *M. rutilus* (251 days, 9500 m), C – under the forepaw of transient female *S. uralensis* (312 days, 10800 m); D – separate hairs on the paw of resident female *S. uralensis* (338 days)

эпизод перемещения самки *S. uralensis*. Причём она оказалась на участке в эпицентре зоны загрязнения, покрыв совокупное расстояние порядка 10800 м, что в настоящее время также является максимальным из известных. Другая самка *S. uralensis* за осенне-зимний период поменяла локацию в пределах зоны загрязнения, переместившись на дистанцию 1500 м с периферии в эпицентр зоны ВУРС. Ранее прямые наблюдения с использованием родаминового мечения позволили зарегистрировать случаи преодоления данного расстояния сеголетками *S. uralensis* разного функционального статуса за 14 ч в тёмное время суток [7].

Примеры системных меток, полученных зимовавшими животными (мигрантами и резидентами) с приманкой, содержащей краситель, представлены на рисунке 2.

Отметим несколько наиболее интересных и принципиально важных результатов. Во-

первых, это феномен перемещения *S. uralensis* (табл. 2, ос. № 7) с контроля в головную часть импактной зоны на рекордное расстояние 10800 м. Судя по выраженности RB-метки (рис. 2С), эта самка-мигрант является транзитной, прошедшей сквозь площадку мечения, но получившая краситель всё-таки с кормом. Метка была гораздо слабее, чем у резидентов, попавшихся в тот же тур отлова на площадке мечения спустя 312 сут.

Во-вторых, во время той же отловочной сессии практически через 10 мес впервые попала оседлая самка *S. araneus* (табл. 2, ос. № 8) (рис. 2А). Другая самка бурозубки (табл. 2, ос. № 14) оказалась мигрантом из зоны ВУРС и отловлена на контроле в апреле 2022 г. через 210 сут после мечения. Само появление этого зверька в апрельском улове неожиданно, поскольку в ходе многолетних исследований установлено, что зимовавшие бурозубки, как

правило, появляются в сборах не ранее июня [17, 25].

В-третьих, особый интерес представляет единственный зимовавший мигрант *M. rutilus* (табл. 2, № 16), пометившийся в зоне ВУРС и отловленный в мае на контроле в 9500 м от площадки мечения (рис. 2В). В процессе перемещения этот зверёк дважды преодолел автомагистраль с интенсивным автомобильным движением. Заметим, красные полевки регистрируются в сборах импактной зоны не ежегодно, относятся к категории редких, их долевое участие составляет менее 10% (табл. 1).

Другая половина животных с меткой (9 из 16) – резиденты, сохранившие связь с территорией и попавшие на площадках мечения через 210, 312, 338 сут. Среди оседлых также преобладали самки (7 самок, 2 самца) (табл. 2).

Ранее при использовании тетрациклина для оценки подвижной и оседлой частей населения в летний период (2002–2005 гг.) данное соотношение составляло 30% к 70% соответственно [17]. Однако этот биомаркер не пригоден для изучения дисперсий в осенне-зимний период в силу ограниченности срока обнаружения тетрациклина (2 мес.) при постоянном стачивании резцов грызунов [26]. Кроме того, тетрациклином невозможно пометить бурозубок-землероек.

Считают, что миграционная подвижность в первую очередь свойственна молодым, сексуально активным самцам, в противоположность зимовавшим самкам, отличающимся повышенной оседлостью [27]. Однако это устоявшееся мнение нарушают результаты нашего исследования, в котором зафиксированы дисперсии самок мышей и бурозубок на дальние дистанции в осенне-зимний период, совершенные ими, скорее всего, до начала периода репродукции. Возможным объяснением феномена могут быть собственные наблюдения, свидетельствующие, что по мере потепления вытаскивает и становится легко доступным большое количество семян растений, в основном древесно-кустарникового яруса, в том числе косточковые. Семена служат полноценными кормами для животных в этот период, необходимыми для их роста, созревания и участия в репродукции. Кроме того, зверьки могут легко перемещаться по поверхности тающего снега на значительные расстояния в поисках высококалорийного корма. О дальних дисперсиях беременных самок *S. araneus* на 1500 м при переселении с натальных участков сообщалось в работе [28]. Впервые перемещения

самок мышей и бурозубок (в том числе беременных) на расстояние 9300 м в зоне ВУРС летом описаны нами [17, 25].

В связи с дальними дисперсиями самок мелких млекопитающих в зоне влияния ВУРС следует упомянуть результаты исследований популяций полёвок-экономок (*Alexandromys oeconotus* Pall.), обитающих на территориях с повышенным содержанием тяжёлых естественных радионуклидов (Ухтинский район, Республика Коми). Выявлены чёткие половые различия в реакции щитовидной железы животных на хроническое облучение в малых дозах [29]. У половозрелых самок с радиоактивных участков выявлено достоверное увеличение экстрафолликулярных клеток в тиреоидной ткани, что рассматривается в качестве индикатора стресса. О возрастании двигательной активности и стрессированности животных с радиового участка свидетельствует увеличение индексов сердца и надпочечников, которые используют в качестве косвенного показателя адренкортикальных функций, поскольку надпочечник не является железой запаса гормонов и чутко реагирует на любое экстремальное воздействие [30]. У полёвок с радиового и уранорадиового участков зарегистрирован феномен «радиационной стимуляции» процессов репродукции (ускоренное созревание фолликулов в яичнике, увеличение потенциальной, фактической и общей плодовитости). По мнению авторов, ионизирующее излучение в малых дозах оказывает модифицирующее действие на структурно-функциональное состояние периферических эндокринных желез (щитовидной железы, надпочечников, яичников) грызунов, способно изменять их реактивность и усиливать влияние внутрипопуляционных процессов.

Временной диапазон сроков сохранения метки у животных из природных популяций находится в пределах 210–338 сут. Для *S. uralensis* максимально зафиксированный срок достиг 338 (рис. 2D), для *S. araneus* – 312 (рис. 2A), для *M. rutilus* – 251 сут. (рис. 2B). По литературным сведениям, наибольшая ранее известная продолжительность сохранения метки млекопитающими составляла 225 сут. [31]; лабораторными мышами – 84 [32] и 423 сут. [15]. Длительное сохранение RB-метки на данном этапе развития этого направления исследований в популяционной экологии является единственной возможностью изучения миграционных процессов, в том числе расселения мелких млекопитающих в продолжительный осенне-зимний период.

Заключение

Проведённые исследования позволили раскрыть и количественно оценить один из фундаментальных популяционных процессов – дальние дисперсии конкретных видов, которые сегодня можно считать нормой для *S. uralensis*, *M. rutilus*, *S. araneus*. Длительное сохранение метки в волосяном покрове животных дало возможность оценить пространственные перемещения зверьков в осенне-зимний период. Выяснилось, что *M. rutilus* способны расселяться на расстояние до 9500 м, а *S. uralensis* – до 10800 м. Это является максимально зарегистрированными из известных дистанций для данных видов. Важным является выявление направлений перемещений: 3 эпизода ВУРС-контроль, один – по территории ВУРС (периферия – эпицентр), один, напротив, контроль-ВУРС, что свидетельствует о высокой активности зверьков вне сезона размножения.

На имеющемся материале показано преобладание самок в группировке зимовавших как среди оседлого населения с меткой, так и среди дальних мигрантов. Возможно, расселение самок является эволюционно более выгодным, поскольку создаёт условия, благоприятствующие поддержанию генетического разнообразия популяций как залога их устойчивого существования в динамичной антропогенной среде.

Полученные результаты принципиально важны при сравнительном изучении биологических эффектов радиационного воздействия у мелких млекопитающих из зон локального загрязнения. Мы полагаем, что наличие дальних мигрантов на столь значительных дистанциях указывает на возможность обмена генетической информацией между популяционными группировками импактной и сопредельных территорий. Это означает, что географические границы радиационного заповедника не совпадают с границами на уровне биологических эффектов – суммарно эти территории значительно превышают размеры зоны загрязнения. Если наша гипотеза верна, то из неё следует, что на прилежащих территориях можно ожидать увеличения генетического разнообразия у мелких млекопитающих, оцениваемого с помощью молекулярно-генетических маркеров.

Методика группового мечения **РВ** показала свою эффективность при исследовании подвижности/оседлости населения в зоне ВУРС в осенне-зимний период. Её целесообразно включить в систему мониторинговых исследований в зонах локальных техноген-

ных загрязнений. Кроме того, она может быть использована для калибровки выборок животных при изучении отдалённых последствий радиационного и других токсических воздействий.

Сбор полевого материала, анализ и интерпретация результатов выполнены в рамках государственного задания ИЭРиЖ УрО РАН (№ 122021000077-6, № 122021000085-1), при подготовке приманки и выявление метки проведены при поддержке РФФИ (№ 20-04-00164).

Авторы благодарят к. б. н. О.В. Толкачева за детекцию метки и фотографии.

Литература

1. Бакуров А.С., Мокров Ю.Г., Тарасов О.В. Альма-матер отечественной радиоэкологии // Вопросы радиационной безопасности. 2017. № 4. С. 18–26.
2. Атлас Восточно-Уральского и Карачаевского радиоактивных следов, включая прогноз до 2047 года. М.: ИГКЭ Росгидромета и РАН, 2013. 140 с.
3. Хляп Л.А. Землеройки // Итоги мечения млекопитающих. М.: Наука, 1980. С. 66–76.
4. Флинт В.Е. Пространственная структура популяций мелких млекопитающих. М.: Наука, 1977. 183 с.
5. Большаков В.Н., Баженов А.В. Радионуклидные методы мечения в популяционной экологии млекопитающих. М.: Наука, 1988. 157 с.
6. Щипанов Н.А. Популяция как единица существования вида. Мелкие млекопитающие // Зоологический журнал. 2003. Т. 82. № 4. С. 450–469.
7. Григоркина Е.Б., Оленев Г.В. Дальние перемещения малой лесной мыши (*Sylvaemus uralensis*, Muridae): скорость и дистанция, выявленные при групповом мечении // Зоологический журнал. 2022. Т. 101. № 11. С. 1300–1304.
8. Theodorakis C.W., Bickham J.W., Lamb T., Medica P.A., Lyne T.B. Integration of genotoxicity and population genetic analyses in kangaroo rats (*Dipodomys merriami*) exposed to radionuclide contamination at the Nevada Test Site, USA // Environ. Toxicol. and Chem. 2001. V. 20. No. 2. P. 317–326.
9. Ryabokon N.I., Goncharova R.I. Transgenerational accumulation of radiation damage in small mammals chronically exposed to Chernobyl fallout // Radiat. Environ. Biophys. 2006. V. 45. No. 3. P. 167–177.
10. Orekhova N.A. Hepatic effects of low-dose rate radiation in natural mouse populations (*Apodemus uralensis* and *Apodemus agrarius*): comparative interspecific analysis // International Journal of Radiation Biology. 2020. V. 96. No. 8. P. 1038–1050.
11. Гилева Э.А., Любашевский Н.М., Стариченко В.И., Романов Г.Н., Чибиряк М.В. Наследуемая хромосомная нестабильность у обыкновенной полёвки

(*Microtus arvalis*) из района Кыштымской ядерной аварии – факт или гипотеза? // Генетика. 1996. Т. 32. № 4. С. 114–119.

12. Ракитин С.Б., Григоркина Е.Б., Оленев Г.В. Анализ микросателлитной ДНК у грызунов из зоны Восточно-Уральского радиоактивного следа и сопредельных территорий // Генетика. 2016. Т. 52. № 4. С. 453–460.

13. Bashlykova L., Rascosha O., Starobor N. Induction of abnormal sperm heads in small mammals under chronic ionizing radiation // Turk. J. Zool. 2019. V. 43. No. 5. P. 540–544.

14. Fisher P. Review of using Rhodamine B as a marker for wildlife studies // Wildl. Soc. Bull. 1999. V. 27. No. 2. P. 318–329.

15. Толкачев О.В., Беспамятных Е.Н. Новый метод детекции родаминовой метки и возможности его применения в зоологических исследованиях // Журнал Сибирского федерального университета. Биология. 2019. Т. 12. № 4. С. 352–365.

16. Tolkachev O. A new baiting scheme and simple method of rhodamine B detection could improve biomarking of small mammals // European Journal of Wildlife Research. 2019. V. 65. Article No. 10.

17. Григоркина Е.Б., Оленев Г.В. Миграции грызунов в зоне локального радиоактивного загрязнения на разных фазах динамики численности и их следствия // Известия РАН. Серия биологическая. 2018. № 1. С. 123–132.

18. Barriopedro D., Fischer E.M., Luterbacher J., Trigo R.M., Garsia-Herrera R. The hot summer of 2010: redrawing the temperature record map of Europe // Science. 2011. V. 332. No. 6026. P. 220–224.

19. Оленев Г.В., Григоркина Е.Б. Эволюционно-экологический анализ стратегий адаптации популяций грызунов в экстремальных условиях // Экология. 2016. № 5. С. 375–381.

20. Чибилёв А.А., Чибилев А.А. Природное районирование Урала с учётом широтной зональности, высотной поясности и вертикальной дифференциации ландшафтов // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 1 (6). С. 1660–1665.

21. Giles R.E., Blanc H., Cann N.M., Wallace D.C. Maternal inheritance of human mitochondrial DNA // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. 1980. V. 77. No. 11. P. 6715–6719.

22. Суходолец В.В. Приспособленность и экологическая устойчивость // Журнал общей биологии. 2004. Т. 65. № 5. С. 417–425.

23. Gowaty P.A., Anderson W.W., Bluhm C.K., Drickamer L.C., Kim Y., Moore A.J. The hypothesis of reproductive compensation and its assumptions about mate preferences and offspring viability // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2007. V. 104. No. 38. P. 15023–15027.

24. Роговин К.А., Мошкин М.П. Авторегуляция численности в популяциях млекопитающих и стресс (штрихи к давно написанной картине) // Журнал общей биологии. 2007. Т. 68. № 4. С. 224–267.

25. Григоркина Е.Б., Оленев Г.В. Нерезидентная активность бурозубок (*Sorex araneus*, Eulipotyphla): массовое мечение // Экология. 2021. № 4. С. 316–320.

26. Клевезаль Г.А., Мина М.В. Методика группового мечения грызунов с помощью тетрациклина и возможности её использования в экологических исследованиях // Зоологический журнал. 1980. Т. 59. № 6. С. 937–941.

27. Лукьянов О.А., Лукьянова Л.Е. Феноменология и анализ миграций в популяциях мелких млекопитающих // Зоологический журнал. 2002. Т. 81. № 9. С. 1107–1134.

28. Щипанов Н.А., Купцов А.В., Демидова Т.Б., Калинин А.А., Александров Д.Ю., Павлова С.В. Нерезидентность и расселение у обыкновенных бурозубок (*Sorex araneus*, Insectivora) // Зоологический журнал. 2008. Т. 87. № 3. С. 331–343.

29. Раскоша О.В., Ермакова О.В. Морфологическое состояние щитовидной железы полёвок-экономок, обитающих в условиях повышенного уровня естественной радиоактивности // Теоретическая и прикладная экология. 2013. № 2. С. 55–61.

30. Ермакова О.В., Раскоша О.В. Популяционная характеристика полёвки-экономки в радиоэкологических исследованиях // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 2. С. 101–107.

31. Fichet-Calvet E. Persistence of a systemic labelling in fur and guard hairs by ingestion of rhodamine B in *Myocastor coypus* (Rodentia) // Mammalia. 1999. V. 63. No. 2. P. 241–244.

32. Jacob J., Jons D.A. Retention of the bait marker Rhodamine B in wild house mice // Wildl. Res. 2002. V. 29. P. 159–164.

References

1. Bakutov A.S., Mokrov Yu.G., Tarasov O.V. Alma-mater of the Russian radioecology // Voprosy radiatsionnoy besopastnosti. 2017. No. 4. P. 18–26 (in Russian).

2. Atlas of the East Ural and Karachai radioactive traces including forecasts up to 2047. Moskva: IGKE Rosgidrometa i RAN, 2013. 140 p. (in Russian).

3. Khlyap L.A. Shrews // Results of Mammal Marking. Moskva: Nauka, 1980. P. 66–76 (in Russian).

4. Flint V.E. The spatial structure of populations of small mammals. Moskva: Nauka, 1977. 183 p. (in Russian).

5. Bol'shakov V.N., Bazhenov A.V. Radionuclide methods of marking in population ecology of mammals. Moskva: Nauka, 1988. 157 p. (in Russian).

6. Shchivanov N.A. Population as a unit of species existence. Small mammals // Zoologicheskyy zhurnal. 2003. V. 82. No. 4. P. 450–469 (in Russian).

7. Grigorkina E.B., Olenev G.V. Long-distance movements of pygmy wood mouse (*Sylvaemus uralensis*, MURIDAE): moving speed and distance revealed by group biomarking // Zoologicheskyy zhurnal. 2022.

V. 101. No. 11. P. 1300–1304 (in Russian). doi: 10.31857/S0044513422110046

8. Theodorakis C.W., Bickham J.W., Lamb T., Medica P.A., Lyne T.B. Integration of genotoxicity and population genetic analyses in kangaroo rats (*Dipodomys merriami*) exposed to radionuclide contamination at the Nevada Test Site, USA // *Environ. Toxicol. and Chem.* 2001. V. 20. No. 2. P. 317–326. doi: 10.1002/etc.5620200212

9. Ryabokon N.I., Goncharova R.I. Transgenerational accumulation of radiation damage in small mammals chronically exposed to Chernobyl fallout // *Radiat. Environ. Biophys.* 2006. V. 45. No. 3. P. 167–177.

10. Orekhova N.A. Hepatic effects of low-dose rate radiation in natural mouse populations (*Apodemus uralensis* and *Apodemus agrarius*): comparative interspecific analysis // *International Journal of Radiation Biology.* 2020. V. 96. No. 8. P. 1038–1050. doi: 10.1080/09553002.2020.1770362

11. Gileva E.A., Lyubashevskii M.N., Starichenko V.I., Romanov G.N., Chibiryak M.V. Hereditary chromosome instability in common vole (*Microtus arvalis*) from the region of the Kyshtym nuclear meltdown: fact or hypothesis? // *Russ. J. Genet.* 1996. V. 32. No. 1. P. 99–104 (in Russian).

12. Rakitin S.B., Grigorkina E.B., Olenev G.V. Analysis of microsatellite DNA in rodents from Eastern Urals radioactive trace zone and contiguous territories // *Russ. J. Genet.* 2016. V. 52. No. 4. P. 398–404 (in Russian). doi: 10.7868/S0016675816030127

13. Bashlykova L., Rascosha O., Starobor N. Induction of abnormal sperm heads in small mammals under chronic ionizing radiation // *Turk. J. Zool.* 2019. V. 43. No. 5. P. 540–544. doi: 10.3906/zoo-1903-6

14. Fisher P. Review of using Rhodamine B as a marker for wildlife studies // *Wildl. Soc. Bull.* 1999. V. 27. No. 2. P. 318–329.

15. Tolkachev O.V., Bespamyatnykh E.N. The new method of rhodamine mark detection and its application possibilities in zoological studies // *Journal of Siberian Federal University. Biology.* 2019. V. 12. No. 4. P. 352–365 (in Russian). doi: 10.17516/1997-1389-0051

16. Tolkachev O. A new baiting scheme and simple method of rhodamine B detection could improve biomarking of small mammals // *European Journal of Wildlife Research.* 2019. V. 65. Article No. 10. doi: 10.1007/s10344-018-1243-5

17. Grigorkina E.B., Olenev G.V. Migrations of rodents in the zone of local radioactive contamination at different phases of population dynamics and their consequences // *Biology Bulletin.* 2018. V. 45. No. 1. P. 110–118 (in Russian). doi: 10.1134/S1062359018010041

18. Barriopedro D., Fischer E.M., Luterbacher J., Trigo R.M., Garsia-Herrera R. The hot summer of 2010: Redrawing the temperature record map of Europe // *Science.* 2011. V. 332. No. 6026. P. 220–224. doi: 10.1126/science.1201224

19. Olenev G.V., Grigorkina E.B. Evolutionary ecological analysis of adaptation strategies of rodent populations under extreme conditions // *Russian Journal of Ecology.*

2016. V. 47. No. 5. P. 486–492 (in Russian). doi: 10.1134/S106741361605009X

20. Chibilyov A.A., Chibilyov A.A. Urals natural zoning based on latitudinal belts, elevation zones and vertical differentiation of landscapes // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN.* 2012. V. 14. No. 1 (6). P. 1660–1665 (in Russian).

21. Giles R.E., Blanc H., Cann N.M., Wallace D.C. Maternal inheritance of human mitochondrial DNA // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.* 1980. V. 77. No. 11. P. 6715–6719. doi: 10.1073/pnas.77.11.6715

22. Sukhodolets V.V. Fitness and ecological resistance // *Zhurnal obshchey biologii.* 2004. V. 65. No. 5. P. 417–425 (in Russian).

23. Gowaty P.A., Anderson W.W., Bluhm C.K., Drickamer L.C., Kim Y., Moore A.J. The hypothesis of reproductive compensation and its assumptions about mate preferences and offspring viability // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2007. V. 104. No. 38. P. 15023–15027. doi: 10.1073/pnas.07066221

24. Rogovin K.A., Moshkin M.P. Autoregulation in mammalian populations and stress: an old theme revisited // *Zhurnal obshchey biologii.* 2007. V. 68. No. 4. P. 224–267 (in Russian).

25. Grigorkina E.B., Olenev G.V. Nonresident activity of shrews (*Sorex araneus*, Eulipotyphla): group marking // *Russian Journal of Ecology.* 2021. V. 52. No. 4. P. 344–348 (in Russian). doi: 10.1134/S1067413621040068

26. Klevezal G.A., Mina M.V. Methods of group labeling of rodents using tetracycline and the possibility of its use in ecological studies // *Zoologicheskyy zhurnal.* 1980. V. 59. No. 6. P. 937–941 (in Russian).

27. Luk'yanov O.A., Luk'yanova L.E. Phenomenology and analysis of dispersal in small mammals population // *Zoologicheskyy zhurnal.* 2002. V. 81. No. 9. P. 1107–1134 (in Russian).

28. Shchipanov N.A., Kuptsov A.V., Demidova T.B., Kalinin A.A., Aleksandrov D.Yu., Pavlova S.V. Nonresidence and dispersal in common shrews (*Sorex araneus*, Insectivora) // *Zoologicheskyy zhurnal.* 2008. V. 87. No. 3. P. 331–343 (in Russian).

29. Raskosha O.V., Ermakova O.V. Morphological condition of a thyroid gland of the tundra-voles inhabiting increased natural radioactivity level // *Theoretical and Applied Ecology.* 2013. No. 2. P. 55–61 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2013-2-055-061

30. Ermakova O.V., Raskosha O.V. Population characteristic of tundra vole in radioecological studies // *Theoretical and Applied Ecology.* 2019. No. 2. P. 101–107 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-2-101-107

31. Fichet-Calvet E. Persistence of a systemic labeling in fur and guard hairs by ingestion of rhodamine B in *Myocastor coypus* (Rodentia) // *Mammalia.* 1999. V. 63. No. 2. P. 241–244.

32. Jacob J., Jons D.A. Retention of the bait marker Rhodamine B in wild house mice // *Wildl. Res.* 2002. V. 29. No. 2. P. 159–164. doi: 10.1071/wr01073

Альтернативная оценка вклада метана в парниковый эффект

© 2023. Г. Я. Кантор^{1,2}, к. т. н., н. с.,Н. В. Сырчина¹, к. х. н., доцент, с. н. с.,¹Вятский государственный университет,

610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

²Институт биологии Коми научного центра

Уральского отделения Российской академии наук,

167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

e-mail: grigory_kantor@mail.ru, nvms1956@mail.ru

Метан относится к числу парниковых газов (ПГ), увеличение концентрации которого в атмосфере вызывает особую тревогу экологов и климатологов. Основными источниками выбросов CH_4 являются добыча и переработка углеводородного сырья, разведение крупного рогатого скота, овцеводство, выращивание риса. Для снижения выбросов CH_4 различные страны берут на себя обязательства, направленные на сокращение объёмов производства в соответствующих отраслях экономики. Однако наши оценки показывают, что принятый Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) вклад метана в глобальное потепление сильно преувеличен. В качестве основного инструмента теоретического анализа использована простейшая модель парникового эффекта, представленная в работах С.М. Семёнова. Спектры поглощения ПГ (значения сечения поглощения молекул H_2O , CO_2 , CH_4 и N_2O в диапазоне волновых чисел $0-3000 \text{ см}^{-1}$) взяты из базы данных HITRAN. Результаты расчётов показывают, что парниковый эффект и формирование средней глобальной температуры поверхности Земли обусловлен почти исключительно двумя веществами – водой и углекислым газом, при этом суммарный вклад CH_4 и N_2O не превышает 1,4%. Полученные результаты дают основания для критической оценки распространённого мнения о высокой опасности актуальных выбросов метана с точки зрения глобального потепления и наблюдающихся климатических изменений. Антропогенные выбросы метана по имеющимся оценкам составляют 9390 млн т в год в CO_2 -эквиваленте, или 375,6 млн т CH_4 в год (с учётом принятого МГЭИК значения потенциала глобального потепления метана). Из них 30% (112,7 млн т) приходится на разведение крупного рогатого скота. При полном прекращении производства молока и говядины снижение средней глобальной температуры за счёт уменьшения выбросов CH_4 составит менее $0,04^\circ\text{C}$, что не превышает 2,5% от целевого ограничения роста глобального потепления на уровне не более $1,5^\circ\text{C}$.

Ключевые слова: парниковый эффект, климат, метан.

Alternative assessment of methane's contribution to the greenhouse effect

© 2023. G. Ya. Kantor^{1,2} ORCID: 0000-0002-6462-6702³N. V. Syrchina¹ ORCID: 0000-0001-8049-6760³¹Vyatka State University,

36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

²The Institute of Biology of Komi Scientific Centre

of Ural Branch of Russian Academy of Sciences,

28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

e-mail: grigory_kantor@mail.ru, nvms1956@mail.ru

Methane is one of the greenhouse gases (GHG), the increase in the concentration of which in the atmosphere is of particular concern to environmentalists and climatologists. The main sources of CH_4 emissions are the extraction and processing of hydrocarbon raw materials, cattle and sheep breeding, and rice cultivation. To reduce CH_4 emissions, various countries are making commitments aimed at reducing production volumes in their respective sectors of the economy. However, our estimates show that the contribution of methane to global warming accepted by the IPCC is greatly exaggerated. The simplest model of the greenhouse effect, presented in the works of S.M. Semenov, was used as the main tool for theoretical analysis. The values of the GHG absorption spectra are taken from the HITRAN database. The results obtained showed that the greenhouse effect and the formation of the average global temperature of the Earth's surface are caused almost exclusively by two substances – water and carbon dioxide, while the total contribution of CH_4 and N_2O does not exceed 1.4%. The results of the calculations provide grounds for a critical assessment of the widespread opinion about the high risk of current CH_4 emissions from the point of view of global warming and the observed climate changes.

Anthropogenic emissions of CH₄ are estimated to be 9390 million tons per year in CO₂ equivalent, or, taking into account the global warming potential of CH₄ accepted by IPCC – 375.6 million tons per year. Of these, 30% (112.7 million tons) fall on the cattle breeding. With the complete cessation of milk and beef production, the decrease in the average global temperature due to the reduction of CH₄ emissions will be less than 0.04 °C, which does not exceed 2.5% of the target limiting the growth of global warming at a level of no more than 1.5 °C.

Keywords: greenhouse effect, climate change, methane.

Общеизвестно, что в формировании климата Земли важную роль играет так называемый «парниковый эффект» – повышение средней температуры земной поверхности и приземных слоёв атмосферы по сравнению с той, которая была бы в отсутствие поглощения инфракрасного излучения атмосферой [1, 2]. Определённый вклад в парниковый эффект вносят все газы, имеющие интенсивные линии поглощения электромагнитного излучения с длиной волны более 3,3 мкм (волновое число менее 3000 см⁻¹). Они получили название парниковых газов (ПГ). Чем выше концентрация парникового газа в атмосфере, тем больше его вклад в парниковый эффект. Многие ПГ присутствуют в атмосфере Земли в ничтожно малой концентрации и не оказывают практически никакого влияния на температуру земной поверхности и, следовательно, климат. Наибольший вклад в парниковый эффект вносят четыре газа – водяной пар H₂O, углекислый газ CO₂, метан CH₄ и оксид азота(I) N₂O [3, 4]. Согласно результатам многолетних наблюдений, концентрация CO₂ в атмосфере в течение последних 50 лет быстро возрастает, что сопровождается ростом средней глобальной температуры [5]. Эта тенденция дала основание предполагать, что основной причиной глобального потепления является накопление CO₂, выбрасываемого в атмосферу при сжигании ископаемого топлива (уголь, нефть, природный и попутный газы, горючие сланцы) объектами энергетики, транспорта и промышленности [6]. На протяжении миллионов лет углерод, входящий в состав ископаемого топлива, был законсервирован (депонирован) в недрах Земли. Человечество для получения тепла использовало главным образом возобновляемые источники энергии (древесину, солому, тростник и т. п.). Углекислый газ, поступающий в атмосферу при сжигании таких материалов, быстро поглощается наземными растениями и фитопланктоном в процессе фотосинтеза, в результате баланс этого газа в атмосфере сохраняется. К нарушению баланса привело активное освоение депонированного углерода. Дополнительные объёмы CO₂, образующиеся при сжигании добываемого из недр Земли топлива, фотосинтезирующие

организмы в современных климатических условиях удалять из атмосферы не успевают, в результате концентрация CO₂ в атмосфере увеличивается, что ведет к усилению парникового эффекта.

В результате активной антропогенной деятельности атмосфера нашей планеты обогащается не только CO₂, но и другими ПГ. В качестве критерия, позволяющего сравнивать вклад различных ПГ в долгосрочное повышение средней температуры климатической системы Земли, было введено понятие «потенциал глобального потепления» – ПГП (Global Warming Potential, GWP), представляющее собой определённый числовой индекс [7–9]. Концепция применения числового индекса для сравнительной оценки вклада различных ПГ в глобальное потепление аналогична концепции потенциала разрушения озонового слоя [10–14]. Фактически ПГП стал своеобразным стандартом для оценки относительной эффективности сокращения выбросов различных ПГ, который удобно использовать в качестве количественной основы «обмена» одного типа сокращения выбросов на другой [15, 16].

В самом общем виде способ расчёта ПГП был предложен в статье [14], хотя термин GWP в ней ещё не применялся. Коэффициент эквивалентности парникового газа вводился как отношение накопленного за определённое время парникового эффекта *i*-го ПГ к накопленному парниковому эффекту диоксида углерода. Накопленный парниковый эффект *i*-го парникового газа AG_i определялся формулой:

$$AG_i = k_i \int_0^T M_i(t) dt,$$

где T – период времени, на который рассчитывается накопленный парниковый эффект; $M_i(t)$ – остаточная масса ПГ по истечении времени t после выброса 1 кг ПГ в атмосферу; k_i – парниковый эффект в расчёте на 1 кг парникового газа. Единицу измерения парникового эффекта при этом не конкретизировали. Окончательный вид (с точностью до обозначений) формула для расчёта ПГП приобрела в Первом оценочном докладе Меж-

правительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) [7]:

$$GWP_{\text{ПГ}} = \frac{\Delta F_{\text{ПГ}} \cdot \int_0^T C_{\text{ПГ}}(t) dt}{\Delta F_{\text{CO}_2} \cdot \int_0^T C_{\text{CO}_2}(t) dt},$$

где $GWP_{\text{ПГ}}$ – потенциал глобального потепления парникового газа; $\Delta F_{\text{ПГ}}$ и ΔF_{CO_2} – величины мгновенного радиационного форсинга для парникового газа и диоксида углерода соответственно в результате выброса в атмосферу одинакового количества (массы или объёма) того и другого газа; $C_{\text{ПГ}}(t)$ и $C_{\text{CO}_2}(t)$ – концентрация парникового газа и диоксида углерода соответственно, убывающая со временем вследствие химической или фотохимической деструкции; T – временной горизонт (20, 100 или 500 лет), t – время.

В этой формуле в качестве конкретной метрики парникового эффекта используется величина так называемого радиационного форсинга – ключевого параметра, упоминание о котором присутствует буквально во всех работах, посвящённых изменению климата. В понятие радиационного форсинга разные авторы нередко вкладывают разный смысл, поэтому следует придерживаться наиболее точного и полного определения, приведённого в глоссарии 6-го оценочного доклада МГЭИК [22]: «Радиационный форсинг – это изменение суммарного (нисходящий минус восходящий) потока радиации (выраженного в Вт/м²) вследствие изменения внешнего фактора изменения климата, такого как изменение концентрации двуокиси углерода (CO₂), концентрации вулканических аэрозолей или мощности излучения Солнца».

Вычисление ПГП на основе радиационного форсинга встретило многочисленную критику, в том числе и от самих авторов этой концепции. В докладе [7] прямо сказано, что предлагаемая концепция является существенно предварительной и требует серьёзного совершенствования, но в соответствии с истиной, что нет ничего более постоянного, чем временное, понятие ПГП до сих пор активно используется для сравнения климатических эффектов от выброса различных парниковых газов, а также эффективности мероприятий по смягчению его последствий.

Важным фактором, влияющим на ПГП парникового газа, является время жизни ПГ в атмосфере. Все парниковые газы (за исключением водяного пара и диоксида углерода) подвергаются химической и фотохимической

деструкции, в результате чего их парниковая активность со временем снижается. Углекислый газ вовлекается в целый ряд биохимических циклов и в конечном итоге также выводится из атмосферы. В наиболее простом случае экспоненциального спада концентрации ПГ после разового выброса за время жизни принимается промежуток времени, за который концентрация снижается в 2,72 раза. Этот промежуток в 1,44 раза больше периода полудеструкции. За тройное время жизни ПГ его концентрация спадает в 20 раз, за пятикратное – в 150 раз. Устойчивые в атмосферных условиях (долгоживущие) ПГ обеспечивают глобальное потепление на более длительный промежуток времени по сравнению с неустойчивыми [17]. Кроме радиационного форсинга и времени жизни, при расчётах ПГП могут учитываться и некоторые дополнительные факторы, оказывающие влияние на парниковый эффект (изменение солнечной постоянной, влияние атмосферных аэрозолей и т. д.) [18, 19].

Единицей измерения ПГП является эквивалент CO₂ – количество выбросов CO₂, которое будет оказывать такое же воздействие на указанный ключевой показатель изменения климата в течение определенного периода времени, как и количество выбросов другого ПГ или смеси других ПГ. В «классическом» определении ПГП таким ключевым показателем является радиационный форсинг. Принятые МГЭИК показатели ПГП используются для обеспечения стандартизированного подхода к оценке вклада различных ПГ в изменение климата, однако возможность оценивания парниковых эффектов различных газов в CO₂-эквиваленте не означает, что эти выбросы имеют эквивалентный эффект по всем ключевым показателям изменения климата [20].

Существуют различные временные горизонты для расчёта ПГП парниковых газов. МГЭИК приводит значения ПГП для 20, 100 и 500 лет. Выбор временного горизонта зависит от цели использования этого показателя. Если цель состоит в том, чтобы определить максимальное изменение температуры, то принимается временной горизонт в 100 лет (или больше). Если показателем изменения климата является скорость изменения температуры, следует рассматривать более короткий временной горизонт [21]. На Конференции Сторон Парижского соглашения в Катовице было принято решение о том, что при представлении сводных данных о выбросах и удалении ПГ каждая Страна использует значения ПГП, выраженные в CO₂-эквиваленте за 100 лет,

приведённые в Пятом оценочном докладе МГЭИК [22] или значения ПГП за 100 лет из последующего доклада [23].

Значения ПГП каждого ПГ регулярно рассматриваются на Конференции Сторон Киотского протокола к Рамочной конвенции ООН и, когда это необходимо, корректируются, при этом в полной мере принимаются во внимание любые соответствующие решения Конференции Сторон [24].

Одна из наиболее серьёзных претензий к концепции ПГП заключается в том, что, вопреки названию, этот параметр не касается температурного эффекта от поступления парникового газа в атмосферу. Для расчёта ПГП используется величина радиационного форсинга, т. е. нарушения баланса вертикальных потоков электромагнитного излучения на верхней границе тропосферы. Форсинг сам по себе не вызывает мгновенного повышения температуры поверхности Земли и приповерхностных слоёв атмосферного воздуха, но вследствие изменения энергетического баланса после выброса ПГ эта температура начинает расти, и рост продолжается до тех пор, пока баланс не будет восстановлен при более высокой температуре поверхности Земли и приповерхностного воздуха.

Для оценки эквивалентности парниковых газов по величине температурного эффекта разными авторами был предложен целый ряд индексов, из которых признание МГЭИК получил Потенциал глобального изменения температуры (Global Temperature Change Potential, GTP), предложенный в работе [8] в нескольких вариантах. Подобно ПГП, GTP рассчитывается на разные временные горизонты (20, 50 или 100 лет).

В последнее время при обсуждении проблемы глобальных климатических изменений фокус внимания переместился с углекислого газа на метан. Концентрация CH_4 в атмосфере значительно ниже, чем концентрация CO_2 , актуальный вклад в поглощение инфракрасного излучения у CH_4 намного меньше, чем у CO_2 и, тем не менее, именно рост концентрации CH_4 вызывает особую тревогу «климатических алармистов». Обоснование справедливости соответствующих опасений базируется на том, что рассчитанная и согласованная МГЭИК величина ПГП CH_4 значительно выше, чем ПГП CO_2 . В соответствии с Докладом МГЭИК 2007, ПГП CH_4 за 100 лет принят равным 25. Часто эта цифра интерпретируется таким образом, что «метан в 25 раз опаснее углекислого газа», поэтому необходимо приложить особые усилия для ограничения выбросов

этого газа в атмосферу. Поскольку основными источниками выбросов CH_4 являются добыча и переработка углеводородного сырья, животноводство (разведение крупного рогатого скота, овцеводство), свалки и выращивание риса [25, 26], считается необходимым создать все условия для ограничения развития соответствующих отраслей экономики.

В качестве подтверждения особой экологической опасности CH_4 в публикациях часто приводятся весьма вольные интерпретации понятия ПГП вроде того, что «метан более эффективно удерживает тепло в атмосфере по сравнению с углекислым газом», «парниковая активность метана обусловлена особо высокой интенсивностью линий поглощения излучения в инфракрасной области» и тому подобные, не имеющие никакого отношения к действительности. Вообще, трактовка ПГП как признака опасности ПГ говорит либо о полном непонимании сути дела, либо об умышленном введении аудитории в заблуждение для достижения неких политических или экономических целей.

Целью настоящей статьи является разъяснение сущности понятия «потенциал глобального потепления», обзор альтернативных сравнительных климатических индексов парниковых газов, а также анализ роли метана в формировании климата Земли.

Объекты и методы исследования

В качестве основного инструмента теоретического анализа мы использовали простейшую математическую модель парникового эффекта, представленную в работах С.М. Семёнова [27, 28]. Источником данных по спектрам поглощения ПГ является база данных HITRAN [29]. Необходимые вычисления выполнены в среде Microsoft Excel 2010.

В качестве исходных данных были приняты следующие значения:

- средняя глобальная температура поверхности суши и океана в 2022 г. +14,76 °C [30];
- солнечная постоянная (энергетическая освещённость на расстоянии 1 астрономической единицы от Солнца) 1368 Вт/м² [31];
- полная масса воды в атмосфере $1,29 \cdot 10^{13}$ т [32], в том числе $1,53 \cdot 10^{12}$ т в конденсированном состоянии [33];
- среднемесячная концентрация диоксида углерода в атмосферном воздухе в 2022 г. 417,06 ppm (ppm – миллионная доля по объёму) [34];
- среднемесячная концентрация метана в атмосферном воздухе в 2022 г. 1,912 ppm [34];

– среднемесячная концентрация оксида азота (I) в атмосферном воздухе в 2022 г. 0,3357 ppm [34];

– нормальная температура атмосферного воздуха 273,15 K (0 °C);

– нормальное давление атмосферного воздуха 101325 Па;

– средняя молярная масса сухого воздуха 28,97 г/моль;

– ускорение свободного падения на поверхности Земли 9,807 м/с².

Для упрощения расчётов атмосфера представляется слоем несжимаемой жидкости постоянного состава, оказывающим при 0 °C давление 101,325 кПа на поверхности Земли (эквивалентная атмосфера при нормальных условиях). Из уравнения Клапейрона-

Менделеева $pV = \frac{m}{\mu}RT$ и выражения для

гидростатического давления $p = \rho gH$ можно найти высоту эквивалентной атмосферы

$H = \frac{RT}{\mu g} = 7994$ м (p – давление воздуха на поверхности Земли, V – объём, m – масса, μ – молярная масса, R – газовая постоянная 8,314 Дж/(моль K), T – абсолютная температура, ρ – плотность, g – ускорение свободного падения).

Плотность воздуха эквивалентной атмосферы $\rho = \frac{p}{gH} = 1,294$ кг/м³, количество вещества на единицу объёма $\nu = \frac{\rho}{\mu} = 44,62$ моль/м³,

молярный объём $\frac{1}{\nu} = 0,0224$ м³/моль, концен-

трация молекул газов, входящих в состав воздуха, равна $n = N_A \cdot \nu = 2,687 \cdot 10^{25}$ м⁻³ (N_A – число Авогадро $6,022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹).

Объём эквивалентной атмосферы равен произведению площади поверхности Земного шара на высоту атмосферы $4\pi R^2 \cdot H = 4,076 \cdot 10^{18}$ м³ (здесь R – средний радиус Земного шара 6371 км).

Результаты и обсуждение

Сущность парникового эффекта, как известно, состоит в следующем. Максимум спектральной плотности солнечного излучения приходится на видимую часть спектра, для которой атмосфера почти прозрачна (будем считать её абсолютно прозрачной). Земная поверхность, поглощая энергию видимого света, переизлучает её в области теплового

инфракрасного излучения. Если бы атмосфера не содержала ПГ, то средняя температура поверхности Земли, как показано ниже, была бы около -18 °C (≈ 255 K).

Плотность потока энергии солнечного излучения, падающего на Землю (солнечная постоянная), равна 1368 Вт/м² [31]. Из этой мощности около 30% отражается облаками и поверхностью Земли (величина альбедо $\alpha \approx 0,3$). В первом приближении средняя плотность потока энергии солнечного света, поступающего в атмосферу, равна $S_0 = 1368 \cdot (1-\alpha)/4 = 239,4$ Вт/м². Коэффициент 1/4 учитывает тот факт, что площадь поверхности Земного шара в 4 раза превышает площадь диска, в виде которого Земля видна со стороны Солнца. В стационарных условиях установившегося динамического равновесия между падающим и уходящим в космос излучением точно такую же величину (239,4 Вт/м²) имеет плотность потока инфракрасного теплового излучения Земли, прошедшего через атмосферу и уходящего в космическое пространство (причём эта величина не зависит от наличия или отсутствия в атмосфере парниковых газов). Этой величине по закону Стефана-Больцмана соответствует температура $T_0 = \left(\frac{S_0}{\sigma}\right)^{1/4} = 254,90$ K =

$-18,25$ °C (σ – постоянная Стефана-Больцмана $5,6704 \cdot 10^{-8}$ Вт · м⁻² · K⁻⁴).

Если в атмосфере присутствуют ПГ, то к потоку энергии видимого света добавляется нисходящий поток теплового излучения атмосферы, нагретой излучением Земли, и динамическое равновесие падающей и уходящей радиации устанавливается при более высокой температуре земной поверхности. Средняя плотность энергии излучения, уходящего с верхней границы атмосферы в космос, независимо от концентрации ПГ остаётся постоянной (239,4 Вт/м²). Разность между повышенной температурой поверхности Земли и той, которая была бы при отсутствии парниковых газов ($-18,25$ °C), и является количественной характеристикой парникового эффекта. Эмпирическая величина парникового эффекта по данным 2022 г. составляет $+14,76 - (-18,25) = 33,01$ °C.

Распределение потоков теплового инфракрасного излучения по высоте эквивалентной атмосферы описывается системой двух дифференциальных уравнений (здесь и далее мы придерживаемся оригинальных обозначений из статей [27, 28]):

$$\frac{dJ^\downarrow(h)}{d(-h)} = -w(h)J^\downarrow(h) + 0,5w(h)[J^\downarrow(h) + J^\uparrow(h)], \quad (1)$$

$$\frac{dJ^\uparrow(h)}{dh} = -w(h)J^\uparrow(h) + 0,5w(h)[J^\downarrow(h) + J^\uparrow(h)], \quad (2)$$

где $J^\downarrow(h)$ и $J^\uparrow(h)$ – нисходящий и восходящий потоки теплового излучения соответственно на высоте h от земной поверхности, $w(h)$ – коэффициент поглощения излучения на высоте h . Здесь мы слегка изменили вид уравнений, заменив в качестве независимой переменной массу нижележащего слоя воздуха M на более наглядную величину – высоту h . На суть решения это не влияет. При этом должны выполняться граничные условия: $S_0 + J^\downarrow(h) = J^\uparrow(h)$ (энергетический баланс нисходящего и восходящего потоков) и $J^\downarrow(H) = 0$ (нисходящий поток теплового излучения на верхней границе атмосферы отсутствует). Здесь H – высота верхней границы эквивалентной атмосферы ($H = 7994$ м), S_0 – плотность потока падающего солнечного излучения ($S_0 = 239,4$ Вт/м²). Эта система уравнений имеет следующие решения [27, 28]:

$$J^\downarrow(h) = 0,5S_0 \int_h^H w(x)dx, \quad (3)$$

$$J^\uparrow(h) = S_0 \left[1 + 0,5 \int_h^H w(x)dx \right]. \quad (4)$$

Восходящий поток теплового инфракрасного излучения на поверхности Земли

$$J^\uparrow(0) = S_0 \left[1 + 0,5 \int_0^H w(x)dx \right]. \quad (5)$$

Интеграл в правой части (5) – это оптическая плотность атмосферы D в единицах натурального логарифма, связанная с коэффициентом пропускания P и коэффициентом поглощения A соотношениями:

$$P = e^{-D}; A = 1 - P = 1 - e^{-D}; D = -\ln P = -\ln(1 - A). \quad (6)$$

Окончательное выражение для температуры поверхности Земли и приповерхностного воздуха принимает вид:

$$T = \left[\frac{\beta}{\sigma} S_0 \left(1 + \frac{D}{2} \right) \right]^{1/4}, \quad (7)$$

где β – калибровочный коэффициент, значение которого подбирается из условия, чтобы при современных концентрациях парниковых газов выражение (7) давало фактически наблюдаемую величину $287,91 \text{ K} = +14,76 \text{ }^\circ\text{C}$. Необходимость корректировки выражения закона Стефана-Больцмана обусловлена тем, что упрощённая модель не учитывает наличие нерadiационных механизмов теплоотдачи (конвекция, испарение) и отличие коэффициента излучения поверхности Земли от единицы.

Для определения величины парникового эффекта парникового газа или смеси парниковых газов необходимо знать коэффициенты поглощения инфракрасного излучения атмосферой по всей ширине спектра $0-3000 \text{ см}^{-1}$. Для расчёта этих коэффициентов можно воспользоваться общедоступными базами данных спектров поглощения газов. В климатических исследованиях наиболее популярна база данных HITRAN [29] (Кембридж, Великобритания), предоставляющая онлайн доступ к детальным спектрам поглощения 55 газов (на 2023 г.). Объём данных HITRAN очень велик. Например, для молекулы CO_2 в диапазоне волновых чисел $0-3000 \text{ см}^{-1}$ база данных содержит сведения по 273735 линиям поглощения электромагнитного излучения. Для ускорения расчётов мы произвели предварительное сглаживание спектров путём суммирования интенсивностей линий по спектральным интервалам шириной 5 см^{-1} с учётом относительного обилия молекул разного изотопного состава (изотопологов). Таким образом, каждый спектр, используемый в данной работе, был представлен 600 отсчётами сечения поглощения молекул, отнесёнными к серединам спектральных интервалов шириной 5 см^{-1} , т. е. волновое число i -го отсчёта (в см^{-1}) задавалось формулой $\nu_i = 2,5 + 5 \cdot i$ ($i = 0-599$). Здесь и далее индексом i будет задаваться номер спектрального интервала, а индексом j – номер парникового газа (1 – H_2O ; 2 – CO_2 ; 3 – CH_4 ; 4 – N_2O). Совокупность сечений поглощения молекул четырёх рассматриваемых газов для 600 волновых чисел составляет матрицу s_{ij} ($i = 0-599, j = 1-4$). Показатель оптического поглощения (экстинкции) j -го газа для i -го волнового числа равен произведению $s_{ij} \cdot n_j$, где n_j – концентрация молекул j -го ПГ, которая может быть вычислена путём умножения концентрации молекул воздуха на объёмную долю j -го газа. Данные по современным концентрациям CO_2, CH_4 и N_2O были взяты из бюллетеней Национального управления океанических и атмосферных исследований

США (NOAA) за 2022 г. [37, 39]: CO₂ – 417 ppm, CH₄ – 1,91 ppm, N₂O – 0,336 ppm. Наибольшей неопределённостью характеризуется концентрация паров воды вследствие интенсивных стохастических процессов испарения, конденсации, кристаллизации и сублимации. Для грубой оценки концентрации молекул воды в атмосфере воспользуемся информацией о том, что в атмосфере в пересчёте на жидкость содержится 12900 км³, или 1,29 · 10¹³ м³ воды [32]. Масса этой воды составляет 1,29 · 10¹⁹ г, из которых по оценке [33] 1530 Гт (1,53 · 10¹⁸ г) находятся в конденсированном состоянии. Таким образом, масса водяного пара, участвующего в создании парникового эффекта, равна 1,14 · 10¹⁹ г, соответствующее количество вещества – 6,311 · 10¹⁷ моль, число молекул пара – 3,801 · 10⁴¹. Учитывая объём эквивалентной атмосферы 4,078 · 10¹⁸ м³, получим концентрацию молекул водяного пара в атмосфере 9,321 · 10²² м⁻³ или 3469 ppm. Таким образом, необходимые для расчёта экстинкции концентрации молекул ПГ равны: n₁ = 9,33 · 10²² м⁻³; n₂ = 1,12 · 10²² м⁻³; n₃ = 5,14 · 10¹⁹ м⁻³; n₄ = 9,02 · 10¹⁸ м⁻³.

Для каждого *i*-го спектрального интервала суммарный показатель экстинкции равен

$$\gamma_i = \sum_{j=1}^4 s_{ij} n_j, \text{ а коэффициент поглощения}$$

$\lambda_i = 1 - e^{-\gamma_i H}$, где *H* – высота эквивалентной атмосферы. Мощность излучения, поглощаемая атмосферой в *i*-м спектральном интервале, равна $B_i \lambda_i$, где B_i – спектральная плотность теплового излучения чёрного тела, вычисляемая

по формуле Планка: $B_i = \frac{2\pi h c^2 \nu_i^3}{e^{kT} - 1} \cdot 500$, где

$h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ м² кг/с (постоянная Планка), $c = 2,998 \cdot 10^8$ м/с (скорость света), $k = 1,3806 \cdot 10^{-23}$ м² кг с⁻² К⁻¹ (постоянная Больцмана), *T* – абсолютная температура поверхности Земли, 500 – ширина спектрального интервала в системе СИ (5 см⁻¹ = 500 м⁻¹). Полная мощность теплового излучения, поглощаемая атмосферой по всей ширине спектра, равна

$$\sum_{i=0}^{599} B_i \lambda_i, \text{ а интегральный коэффициент погло-$$

$$\text{щения } A = \frac{\sum_{i=0}^{599} B_i \lambda_i}{\sum_{i=0}^{599} B_i}.$$

Подстановка величины

$D = -\ln(1 - A)$ в уравнение (7) позволяет вы-

числить температуру поверхности Земли *T*, а разность $T - T_0$ даёт величину парникового эффекта.

Необходимо отметить, что расчёт температуры земной поверхности с учётом парникового эффекта производится при некотором начальном предположении о значении этой температуры. Возникающее в результате расчёта расхождение можно устранить, используя надстройку Подбор параметра пакета Microsoft Excel. Для этого в целевую ячейку нужно ввести разность начальной и конечной температуры и выполнить подбор параметра, приравнивая разность нулю. Эта же надстройка позволяет вычислить значение калибровочного коэффициента β .

Оценить вклад отдельного ПГ (парциальный парниковый эффект) в общий эффект можно двояким образом. В аддитивном варианте расчёта газ в его актуальной концентрации добавляется к изначально «чистому» воздуху (не содержащему парниковых газов). В таком случае рассчитанный парниковый эффект будет приписан к добавленному газу. Недостаток такого метода заключается в том, что при этом не учитывается перекрытие спектральных линий различных газов, что даёт завышенную величину каждого парциального парникового эффекта и общего эффекта в целом. В субтрактивном варианте сначала рассчитывается общий парниковый эффект, а затем из смеси удаляется какой-либо один газ, и снижение приземной температуры характеризует величину вклада удалённого газа в общий парниковый эффект.

В таблице приведены результаты расчётов величины парникового эффекта для различных вариантов состава атмосферного воздуха и соответствующие значения приземной температуры. Для вариантов 2–4 приведены результаты расчёта аддитивным методом, а для вариантов 7–10 – субтрактивным. Значения парциального парникового эффекта в вариантах 2–4 относятся к единственному парниковому газу, присутствующему в смеси, а в вариантах 7–10 – к отсутствующему. На рисунке приведены значения парциального парникового эффекта, вычисленные субтрактивным методом, и доля каждого ПГ в суммарном эффекте (под суммарным эффектом подразумевается сумма парциальных эффектов отдельных газов). Отметим, что общий парниковый эффект смеси газов отличается от суммы парциальных эффектов отдельных ПГ, поскольку температура не является аддитивной физической величиной. Значение кали-

Таблица / Table

Парниковый эффект при различных вариантах состава атмосферного воздуха
Greenhouse effect under different variants of atmospheric air composition

Вариант Option	Концентрации парниковых газов Greenhouse gas concentrations ppm				Оптическая плотность Optical density	Температура земной поверхности Earth surface temperature °C	Общий парниковый эффект Total greenhouse effect °C	Парциальный парниковый эффект Partial greenhouse effect °C
	H ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O				
1	–	–	–	–	0,0000	–18,25	0,00	–
2	3469	–	–	–	1,2010	+10,32	28,57	28,57
3	–	417,06	–	–	0,2528	–11,16	7,08	7,08
4	–	–	1,912	–	0,0223	–17,59	0,66	0,66
5	–	–	–	0,3357	0,0198	–17,66	0,58	0,58
6	3469	417,06	1,912		1,4377	+14,76	33,01	–
7	–	–	–	–	0,2926	–10,11	8,13	24,87
8	3469	–	–	–	1,2369	+11,01	29,26	3,75
9		417,06	–	–	1,4248	+14,52	32,77	0,24
10	–	–	1,912	–	1,4284	+14,59	32,84	0,17
11	–	834,12	–	0,3357	1,4839	+15,59	33,84	0,83*
12	–	417,06	3,824		–	1,4435	+14,87	33,11

Примечание: * – приведена величина повышения средней глобальной температуры при удвоении концентрации CO₂ (вариант 11) и CH₄ (вариант 12).

Note: * – the increase in the average global temperature is given with a doubling of the concentration of CO₂ (option 11) and CH₄ (option 12).

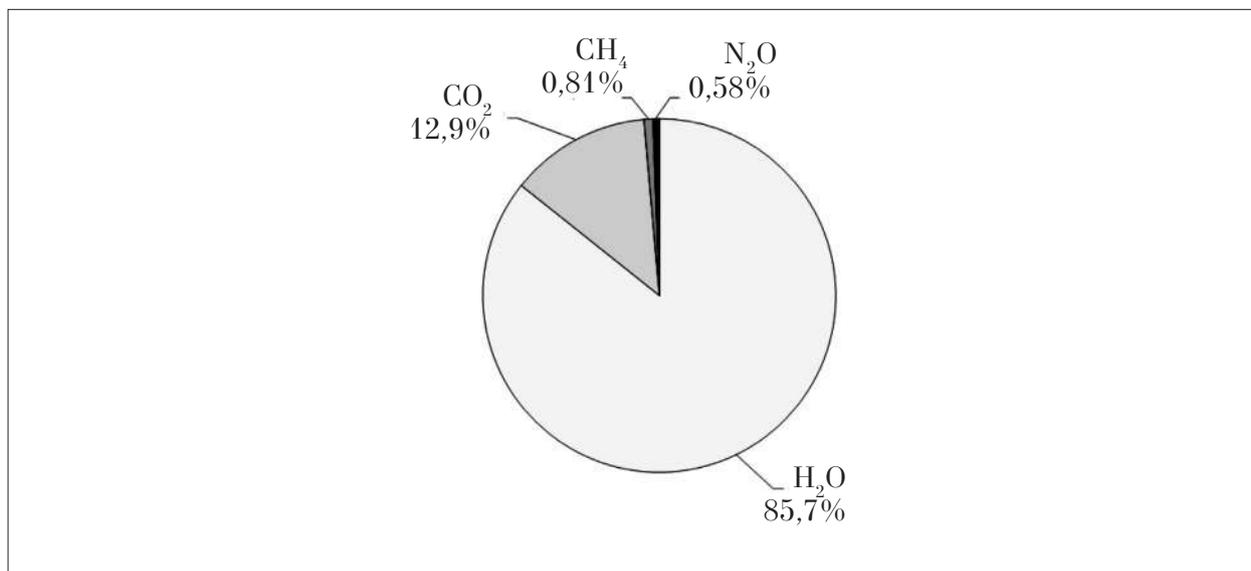


Рис. Вклад основных парниковых газов в общий парниковый эффект
Fig. Contribution of major greenhouse gases to the total greenhouse effect

бровочного коэффициента β для смеси всех четырёх ПГ было принято равным 0,947, а для остальных вариантов состава атмосферного воздуха вычислялось по формуле $\beta = 1 - 0,0370 \cdot D$ (D – оптическая плотность).

Кроме того, в таблице (варианты 11 и 12) представлены последствия двукратного повышения концентрации CO₂ и CH₄ соответственно.

Из приведённых данных очевидно, что парниковый эффект на Земле обусловлен

почти исключительно двумя компонентами атмосферного воздуха – парами воды и углекислым газом. Влияние CH_4 и N_2O на парниковый эффект пренебрежимо мало (суммарно 1,39%), и рассуждения о значительном вкладе этих газов в климатические изменения следует признать некорректными (не говоря уже о прочих ПГ, концентрация которых измеряется триллионными долями). Следует отметить, что H_2O не входит в число ПГ, выбросы которых подлежат регулированию [4].

В последние годы в работах, посвящённых глобальному потеплению, упор делается на необходимость сокращения антропогенных выбросов CH_4 , 30% которых приходится на сельское хозяйство (в основном на животноводство) [35]. В качестве первоочередной меры предлагается существенно сократить поголовье крупного рогатого скота, а потребность в животном белке компенсировать за счёт употребления в пищу крупных насекомых, выращивание которых не сопровождается существенными выбросами CH_4 . С этой точки зрения интересно оценить климатический эффект полного прекращения производства молока и говядины.

В качестве исходных данных по антропогенным выбросам CH_4 воспользуемся опубликованными сведениями о мировых выбросах этого газа [36]. Антропогенные выбросы CH_4 по имеющимся оценкам составляют 9390 млн т в год в CO_2 -эквиваленте, или с учётом потенциала глобального потепления – 375,6 млн т CH_4 в год. Из них 30% (112,7 млн т в год) приходится на животноводство (27% за счёт желудочной ферментации + 3% за счёт обращения с навозом). Необходимо учесть время жизни CH_4 в атмосфере (12 лет) и тот факт, что установившееся стационарное количество газа в атмосфере равно произведению годового выброса на время жизни газа. Таким образом, масса CH_4 в атмосфере, накопленная за счёт животноводства, составляет 1352 млн т или в пересчёте на объём $1,888 \cdot 10^{12} \text{ м}^3$ (учтена молярная масса метана 16,04 г/моль и молярный объём 0,0224 м³/моль). Объём эквивалентной атмосферы равен $4 \pi R^2 H = 4,077 \cdot 10^{18} \text{ м}^3$ (R – средний радиус Земли 6371 км, H – высота эквивалентной атмосферы 7994 м). Доля «животноводческого» метана в атмосфере составляет $1,888 \cdot 10^{12} / 4,077 \cdot 10^{18} = 4,631 \cdot 10^{-7}$, или 0,463 ppm. В случае полного прекращения производства молока и говядины концентрация метана составит 1,449 ppm. Расчёт приземной температуры и величины парникового эффекта для этой концентрации CH_4 даёт следующие результаты: величина

парникового эффекта = 32,97 °С, приземная температура 14,723 °С, т. е. снижение средней глобальной температуры составит 0,037 °С. Полученный результат даёт основания задуматься об истинных целях «демонизации» CH_4 и о возможных последствиях сокращения объёмов добычи углеводородного сырья и производства животноводческой продукции.

В качестве дополнительного подтверждения корректности полученного результата можно привести оценку роли эмиссии метана от газовой отрасли России в глобальной климатической динамике [37]. Расчёт климатического эффекта от полного прекращения выбросов метана предприятиями ПАО «Газпром» даёт снижение среднегодовой глобальной равновесной температуры у поверхности Земли на 0,003–0,0076 °С. Такие оценки красноречиво говорят о том, что любые мероприятия по снижению выбросов метана в атмосферу лишены какого-либо практического смысла.

Заключение

Расчёты, выполненные на основе простейшей математической модели парникового эффекта в земной атмосфере и детальных спектров поглощения теплового инфракрасного излучения показали, что парниковый эффект и формирование средней глобальной температуры поверхности Земли обусловлены почти исключительно двумя веществами (водой и углекислым газом), при этом суммарный вклад CH_4 и N_2O не превышает 1,4%. Результаты расчётов дают основания для критической оценки распространённого мнения о высокой опасности актуальных выбросов CH_4 с точки зрения глобального потепления и наблюдающихся климатических изменений. Показано, что в результате полного прекращения производства молока и говядины снижение средней глобальной температуры составит менее 0,04 °С.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Структура и состояние компонентов техногенных экосистем подзоны южной тайги», номер государственной регистрации в ЕГИСУ № 1220401000325.

References

1. Mitchell J.F.B. The “greenhouse” effect and climate change // Reviews of Geophysics. 1989. V. 27. No. 1. P. 115–139. doi: 10.1029/RG027i001p00115

2. Jones M.D.H., Henderson-Sellers A. History of the greenhouse effect // *Progress in Physical Geography*. 1990. V. 14. No. 1. P. 1–18. doi: 10.1177/030913339001400
3. Iwata H., Okada K. Greenhouse gas emissions and the role of the Kyoto Protocol // *Environmental Economics and Policy Studies*. 2014. V. 16. P. 325–342. doi: 10.1007/s10018-012-0047-1
4. Syrchina N.V., Kantor G.Ya., Pugach V.N., Ashikhmina T.Ya. Contribution of carbon dioxide and water to the greenhouse effect // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 4. P. 218–223 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-4-218-223
5. Global climate change [Internet resource] <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/> (Accessed: 25.01.2023).
6. Myhrvold N.P., Caldeira K. Greenhouse gases, climate change and the transition from coal to low-carbon electricity // *Environmental Research Letters*. 2012. V. 7. No. 1. Article No. 014019. doi: 10.1088/1748-9326/7/1/014019
7. Climate Change: The IPCC Scientific Assessment. Report Prepared for IPCC by Working Group I / Eds. J.T. Houghton, G.J. Jenkins, J.J. Ephraums (Meteorological Office, Bracknell, United Kingdom. 1990 [Internet resource] https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ipcc_far_wg_i_full_report.pdf (Accessed: 01.02.2023).
8. Shine K.P., Fuglestedt J.S., Hailemariam K., Stuber N. Alternatives to the global warming potential for comparing climate impacts of emissions of greenhouse gases // *Climatic Change*. 2005. V. 68. No. 3. P. 281–302. doi: 10.1007/s10584-005-1146-9
9. Neubauer S.C. Global warming potential is not an ecosystem property // *Ecosystems*. 2021. V. 24. P. 2079–2089. doi: 10.1007/s10021-021-00631-x
10. Wuebbles D.J. Chlorocarbon emission scenarios: potential impact on stratospheric ozone // *Journal of Geophysical Research*. 1983. V. 88. No. C2. P. 1433–1443. doi: 10.1029/JC088iC02p1433
11. Lashof D.A., Ahuja D.R. Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming // *Nature*. 1990. V. 344. No. 6266. P. 529–531. doi: 10.1038/344529a0
12. Rogers J.D., Stephens R.D. Absolute infrared intensities for F-113 and F-114 and an assessment of their greenhouse warming potential relative to other chlorofluorocarbons // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1988. V. 93. P. 2423–2428. doi: 10.1029/JD093iD03p02423
13. Fisher C.R., Hales C., Wang W.C., Ko M., Sze N.D. Model calculations of the relative effects of CFCs and their replacements on global warming // *Nature*. 1990. V. 344. P. 513–516. doi: 10.1038/344513a0
14. Rodhe H. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect // *Science*. 1990. V. 248. No. 4960. P. 1217–1219. doi: 10.1126/science.248.4960.1217
15. Smith S.J., Wigley M.L. Global warming potentials: 1. Climatic implications of emissions reductions // *Climatic Change*. 2000. V. 44. No. 4. P. 445–457. doi: 10.1023/A:1005584914078
16. Smith S.J., Wigley T.M.L. Global warming potentials: 2. Accuracy // *Climatic Change*. 2000. V. 44. No. 4. P. 459–469. doi: 10.1023/A:1005537014987
17. Khalil M.A.K. Non-CO₂ greenhouse gases in the atmosphere // *Annual Review of Energy and the Environment*. 1999. V. 24. No. 1. P. 645–661. doi: 10.1146/annurev.energy.24.1.645
18. Fuglestedt J.S., Berntsen T.K., Godal O., Sausen R., Shine K.P., Skodvin T. Assessing Metrics of Climate Change: Current Methods and Future Possibilities. CICERO Report 2001:04. Oslo, Norway [Internet resource] https://pub.cicero.oslo.no/cicero-xmlui/bitstream/handle/11250/192042/CICERO_Report_2001-4.pdf?sequence=1&isAllowed=y (Accessed: 01.02.2023).
19. Wigley T.M.L. The Kyoto Protocol: CO₂, CH₄ and climate implications // *Geophysical research letters*. 1998. V. 25. No. 13. P. 2285–2288. doi: 10.1029/98GL01855
20. IPCC, 2021: Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the Sixth assessment report of the Intergovernmental panel on climate change / Eds. V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2391 p. doi: 10.1017/9781009157896
21. Scheutz C., Kjeldsen P., Gentil E. Greenhouse gases, radiative forcing, global warming potential and waste management – an introduction // *Waste Management & Research*. 2009. V. 27. No. 8. P. 716–723. doi: 10.1177/0734242X09345599
22. IPCC, 2014: Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change / Eds. R.K. Pachauri, L.A. Meyer. IPCC, Geneva, Switzerland. 151 p.
23. Report of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Paris Agreement on the third part of its first session, held in Katowice from 2 to 15 December 2018. FCCC/PA/CMA/2018/3/Add.2 [Internet resource] <https://ledslac.org/wp-content/uploads/2020/09/e.-Decision-18-cma.1.pdf> (Accessed: 25.01.2023).
24. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change [Internet resource] <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf> (Accessed: 25.01.2023).
25. Karakurt I., Aydin G., Aydiner K. Sources and mitigation of methane emissions by sectors: A critical review // *Renewable Energy*. 2012. V. 39. No. 1. P. 40–48. doi: 10.1016/j.renene.2011.09.006

26. Kantor G.Ya., Syrchina N.V., Ashokhmina T.Ya. Modeling the carbon balance of municipal solid waste landfills // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 1. P. 198–204 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-198-204
27. Semenov S.M. Greenhouse effect and its anthropogenic enhancement // *Solnechno-zemnaya Fizika*. 2012. V. 21. P. 10–17 (in Russian).
28. Semenov S.M. Greenhouse effect: discovery, concept development, role in formation of global climate and its human-induced changes // *Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologiya*. 2015. No. 2. C. 103–126 (in Russian).
29. The HITRAN database [Internet resource] <https://hitran.org/> (Accessed: 25.01.2023).
30. National Oceanic and Atmospheric Administration (USA): Annual 2022 Global Climate Report [Internet resource] <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202213> (Accessed: 30.06.2023).
31. Shirley J.H. Solar constant // *Encyclopedia of planetary science*. Encyclopedia of earth science. Springer, Dordrecht, 1997. P. 745–746. doi: 10.1007/1-4020-4520-4_370
32. Quante M., Matthias V. Water in the Earth's atmosphere // *Journal de Physique IV France*. 2006. V. 139. No. 1. P. 37–61. doi: 10.1051/jp4:2006139005
33. Galashev A.E. Molecular-dynamic modeling of ultradisperse water in the Earth atmosphere // *High Temperature*. 2010. V. 48. No. 4. P. 518–526. doi: 10.1134/S0018151X10040097
34. National Oceanic and Atmospheric Administration (USA): Greenhouse gases continued to increase rapidly in 2022 [Internet resource] <https://www.noaa.gov/news-release/greenhouse-gases-continued-to-increase-rapidly-in-2022> (Accessed: 30.06.2023).
35. Gerber P.J., Hristov A.N., Henderson B., Makkar H., Oh J., Lee C., Meinen R., Montes F., Ott T., Firkins J., Rotz A., Dell C., Adesogan A.T., Yang W.Z., Tricarico J.M., Kebreab E., Waghorn G., Dijkstra J., Oosting S. Technical options for the mitigation of direct methane and nitrous oxide emissions from livestock: a review // *Animal*. 2013. V. 7. No. s2. P. 220–234. doi: 10.1017/S1751731113000876
36. Global methane emissions and mitigation opportunities [Internet resource] <https://www.globalmethane.org/documents/gmi-mitigation-factsheet.pdf> (Accessed: 30.06.2023).
37. Methane and climate change: scientific problems and technological aspects. Edited by academician of the RAS V.G. Bondur, academician of the RAS I.I. Mokhov, correspondent member of the RAS A.A. Makosk. Moskva: Russian Academy of Sciences, 2022. 388 p. (in Russian).

Климатическое моделирование пригодности местообитаний *Erythronium sibiricum* (Fisch. et C.A. Mey.) Krylov

© 2023. А. В. Ваганов, к. б. н., в. н. с., доцент,
Е. А. Жолнерова, м. н. с., аспирант,
В. Ф. Зайков, м. н. с., аспирант, А. И. Шмаков, д. б. н., профессор,
Южно-Сибирский ботанический сад
Алтайского государственного университета,
656049, Россия, г. Барнаул, пр. Ленина, д. 61,
e-mail: vaganov_vav@mail.ru

Кандык сибирский *Erythronium sibiricum* (Fisch. et C.A. Mey.) Krylov (семейство Liliaceae L.) – алтае-саянский эндемик, реликт третичных широколиственных лесов, преимущественно лесной мезофит. Это растение занесено в ряд региональных Красных книг и Красную Книгу Российской Федерации (редкий вид, сокращающийся в численности в природных популяциях). Методом максимальной энтропии (MaxEnt) построена модель пригодности местообитаний *E. sibiricum*. Исходными данными для моделирования потенциального распространения послужили климатические параметры WorldClim и фактические места находок вида, полученные из гербарных фондов и природной среды. Доказано, что *E. sibiricum* демонстрирует достаточно широкую экологическую амплитуду; моделирование прогнозных местообитаний *E. sibiricum* показало практически равное влияние температурного фактора (46,4%) и осадков (41,8%) как сдерживающих расширение ареала вида, что коррелирует с распространением *E. sibiricum* в пределах типов климата по Коппен-Гейгеру. Полученные сведения по красиво цветущему *E. sibiricum* и сам методологический подход могут быть востребованными для решения подобных природоохранных задач в конкретных районах и субъектах Российской Федерации.

Ключевые слова: *Erythronium sibiricum*, ареал, гербарий, климат, Сибирь, моделирование, эндемик, DIVA-GIS, GBIF, MaxEnt.

Climatic modeling of the habitat suitability of *Erythronium sibiricum* (Fisch. et C.A. Mey.) Krylov

© 2023. A. V. Vaganov ^{ORCID: 0000-0002-7584-5150}, E. A. Zholnerova ^{ORCID: 0000-0003-3697-4811},
V. F. Zaikov ^{ORCID: 0000-0003-1641-9458}, A. I. Shmakov ^{ORCID: 0000-0002-1052-4575}
South-Siberian Botanical Garden of Altai State University,
61, Prospekt Lenina, Barnaul, Russia, 656049,
e-mail: vaganov_vav@mail.ru

The *Erythronium sibiricum* (Fisch. et C.A. Mey.) Krylov (family Liliaceae L.) is an Altai-Sayan endemic, a relic of tertiary broad-leaved forests, predominantly a forest mesophyte. *Erythronium sibiricum* is listed in a number of regional Red Books and the Russian Red Data Book (a rare species whose number is constantly decreasing in natural populations). Maximum entropy method (MaxEnt) was used to construct a model of suitability of *E. sibiricum* habitat. The initial data for the modeling the potential distribution were the climatic parameters of WorldClim and the actual records from herbarium funds and from nature. The resulting maps made it possible to clarify the current distribution area of *E. sibiricum* and obtain predictive maps of the probabilistic location of the species in the south of Siberia. Such studies using bioclimatic modeling methods and modern GIS have already confirmed their validity. These works are based on the study of the influence of climate, as one of the decisive factors for the successful introduction of plants. It has been proved that *E. sibiricum* demonstrates wide ecological amplitude. Modeling of the predicted habitats of *E. sibiricum* showed almost equal influence of the temperature factor (46.4%) and precipitation (41.8%) as restraining the expansion of the species range, which correlates with the distribution of *E. sibiricum* within the climate types according to Coppen-Geiger. These works are based on the study of the influence of climate, as one of factors for the successful introduction of plants. Data obtained on beautifully blooming *E. sibiricum* and methodological approach could be used for solving environmental problems in some regions of the Russian Federation.

Keywords: *Erythronium sibiricum*, areal, herbarium, climate, Siberia, modeling, endemic, DIVA-GIS, GBIF, MaxEnt.

Направление экологического моделирования в последние годы активно развивается, растёт число публикаций и увеличивается число исследованных данным методом объектов [1, 2]. При этом потенциальный ареал исследуемого таксона может быть уже заселён экологически схожими видами вследствие сложившихся причин различного генезиса [3]. В последние годы в зарубежной и отечественной литературе наиболее широкое применение для моделирования пространственного распространения видов (species distribution modeling) приобрёл метод максимальной энтропии (MaxEnt, Maximum Entropy Species Distribution Modelling) [3–15].

Климат – важнейший фактор, влияющий на формирование и распространение наземных экосистем [16, 17]. Отмечается важность последствий, связанных с изменением климата, которые неизбежно влекут за собой изменение видового состава экосистем, смещение границ экологических регионов и биогеографических зон [12, 18]. При этом закрепление и расселение видов на новой территории зависит от множества причин: конкурентоспособности вида, особенности размножения и пр. [9, 19, 20].

Erythronium sibiricum (Fisch. et C.A. Mey.) Krylov (семейство Liliaceae L.) – алтае-саянский эндемик, реликт третичных широколиственных лесов, преимущественно лесной мезофит, ранневесенний медонос, используется как декоративное растение [21]. Это растение занесено в ряд региональных Красных книг по статусу 2 (v) как редкий, сокращающийся в численности в природных популяциях, а в отдельных местообитаниях способен перейти в категорию 1 (E). *Erythronium sibiricum* имеет азиатский, южно-сибирский ареал, границы которого можно уложить в прямоугольник с координатами 48–58° N и 80–97° E. Вид распространён в разнородных условиях по климатическим факторам – от таёжной до лесостепной зон. Для территории Восточного Казахстана [22] и севера Синьцзян-Уйгурского автономного района Китая [23] данный вид приводится как редкий. Вегетативное размножение у *E. sibiricum* развито слабо (коэффициент вегетативного размножения очень низкий), в ежегодно возобновляемой луковичке практически не закладывается придаточная почка [24].

Известно более 272 географических пунктов, в окрестностях которых вид произрастает [21]. Для составления ареала *E. sibiricum* точечным методом ранее были получены карты

[25], которые в последующем были уточнены в [26]. Однако до настоящего момента и при простривии более 30 лет полных данных о пространственном распространении *E. sibiricum* никто не приводил.

Для Западной Сибири характерен горизонтальный тип зональности [27], где *E. sibiricum*, наряду с другими ранневесенними эфемероидами, в наибольшей степени встречается в бореально-лесной области по опушкам и осветлённым местам темнохвойной тайги: пихтово-кедровой, елово-кедровой, пихтовой. Предполагается, что *E. sibiricum* ранее был более теплолюбивым видом, но позднее адаптировался к изменившимся климатическим условиям и «поднялся» в горы вместе с лесными участками (до 1700 м над уровнем моря на Алтае) [21].

Цель исследования – картирование пригодных для *E. sibiricum* местообитаний путём климатического моделирования.

Объекты и методы исследования

Юг Западной Сибири и предгорья Алтая имеют характерные черты умеренного (бореального) климата со среднегодовым количеством осадков 400–500 мм, максимум их приходится на летний период. Высотная поясность, расчленённость и аazonальные черты рельефа способствуют неравномерному распределению осадков и температуры воздуха данного региона [21, 28]. Климат здесь типично континентальный. По классификации типов климата Коппен-Гейгера [29] ареал *E. sibiricum* находится преимущественно в двух областях холодного климата с тёплым летом – без сухого сезона (Dfb) и с сухой зимой (Dwb). Северную границу ареала ограничивает область холодного климата без сухого сезона с холодным летом (Dfc), а с юго-восточной стороны – аридная область с холодными степными (BSk) и пустынными элементами климата (BWk).

Географические координаты мест сбора *E. sibiricum* были получены нами на основе координат с этикеточных данных гербарного материала следующих фондов: АЛТВ (Южно-Сибирский ботанический сад Алтайского государственного университета, г. Барнаул – период охвата исследованного материала – с 1971 по 2013 гг.), NS (NSK) (Центральный Сибирский ботанический сад СО РАН и Гербарий имени М.Г. Попова, г. Новосибирск – с 1941 по 2013 гг.). Дистанционно были задействованы данные коллекций MW (Московский

государственный университет имени М.В. Ломоносова – с 1837 по 1992 гг.) и Е (Королевский ботанический сад Эдинбурга, Великобритания – с 1971 по 2013 гг.) [30]. Ввиду того, что в гербарных фондах было всего 177 этикеток с точными координатами (без учётов повторов), а вид достаточно легко определяем по фотографии, то мы дополнительно использовали 396 наблюдений с iNaturalist и данные летописи природы Тигирекского государственного природного заповедника (период охвата наблюдений в природе – с 2005 по 2022 гг.). Сведения о локалитетах культивируемых растений и повторы с одинаковыми координатами (дубли) не использовались в исследовании (всего 111 таких случаев). После коррекции пространственной неравномерности мест произрастания *E. sibiricum* с помощью программы SDMtoolbox [31], являющейся приложением к программе ArcGIS 10.5, было исключено ещё 278 локалитетов (spatially rarefying occurrence data – 10 km). В итоге в работе в качестве фактической основы для моделирования потенциального ареала было использовано 184 локалитета.

При составлении карт распространения вида использовали ГИС-программу DIVA-GIS 7.5. Климатическое моделирование пригодных для расселения местообитаний производили в программе MaxEnt 3.4.1 [32].

Ввиду разнообразия типов климатов для местообитаний *E. sibiricum* при первоначальном моделировании нами были использованы все климатические параметры WorldClim [33]. Для составления прогнозной карты была применена климатическая модель с разрешением 5 км на один пиксель. При проведении анализа в программе MaxEnt для карт распространения видов использовали логистический выходной формат. Обучающая и тестовая выборка составили 75 и 25% соответственно (138 на 46 локалитетов). Индекс пригодности для прогнозного местообитания таксона (AUC) был рассчитан для обучающего и тестового набора данных. Выбор оптимальной модели производится пошагово, максимальное число итераций было установлено в 500 значений [34]. Ввиду достаточно большого числа уникальных локалитетов (184) и рекомендаций исследователей в данной области [7, 14, 34] были использованы все типы «функции предикторов». Набор точек отсутствия вида на территории заменён в MaxEnt случайной выборкой из фоновых точек [6]. Оценка вклада каждой переменной произведена по тесту «складной нож» («jackknife») [6]. Использо-

вание метода «jackknife» основано на сравнении моделей, построенных на каждом из факторов, с моделями, построенными без этого фактора [34]. Оценка вклада климатических параметров для моделирования произведена по показателю «permutation importance» [7]. Модель, полученная в результате анализа в программе MaxEnt, была обработана и подготовлена картографическая основа в программе DIVA-GIS 7.5. Территория для климатического моделирования прогнозного распространения *E. sibiricum* выбрана шире, чем его ареал и была ограничена следующим диапазоном координат: 40–70° N, 60–130° E.

Результаты и обсуждение

При моделировании в MaxEnt с помощью алгоритма «jackknife» установлено, что четыре переменные из девятнадцати оказывают наибольшее влияние (88,2 из 100%) (в порядке убывания вклада): BIO3 – изотермальность (BIO1/BIO7)×100 (26,7%); BIO14 – осадки наиболее сухого периода (22,3%); BIO7 – среднегодовая амплитуда колебания температуры (BIO5–BIO6) (19,7%) и BIO18 – осадки наиболее тёплого квартала (19,5%). Исходя из полученного результата вклада каждого фактора в модель по тесту «важность при пермутации», было произведено климатическое моделирование исключительно с данными по четырём параметрам (BIO – 3, 14, 18 и 7, рис. 1, см. цв. вкладку VIII). Это необходимо, как отмечают авторы [12, 35], в целях минимизирования действия факторов, оказывающих слабое влияние на климатическую модель, а также проблем мультиколлинеарности.

Наиболее важным результирующим показателем состоятельности прогнозной модели является индекс AUC (мера относительной вероятности присутствия). По значению AUC качество моделирования можно условно разделить на пять категорий: 0,9–1,0 – «отлично»; 0,8–0,9 – «хорошо»; 0,7–0,8 – «удовлетворительно»; 0,6–0,7 – «плохо»; 0,6 – «очень плохо» (моделирование не удалось) [32, 36]. Случайное же распределение результатов моделирования соответствует значению AUC = 0–0,5. По индексу AUC тестовой выборки наша прогнозная модель показала высокое качество интерпретации результата. AUC для *E. sibiricum* составил значение 0,966±0,006 (коэффициент оmissии – +0,04; кумулятивный порог – +1,6).

Графики тестирования качества полученных данных для *E. sibiricum* (рис. 2) под-

А. В. Ваганов, Е. А. Жолнерова, В. Ф. Зайков, А. И. Шмаков
«Климатическое моделирование пригодности местообитаний
***Erythronium sibiricum* (Fisch. et C.A. Mey.) Krylov». С. 208.**

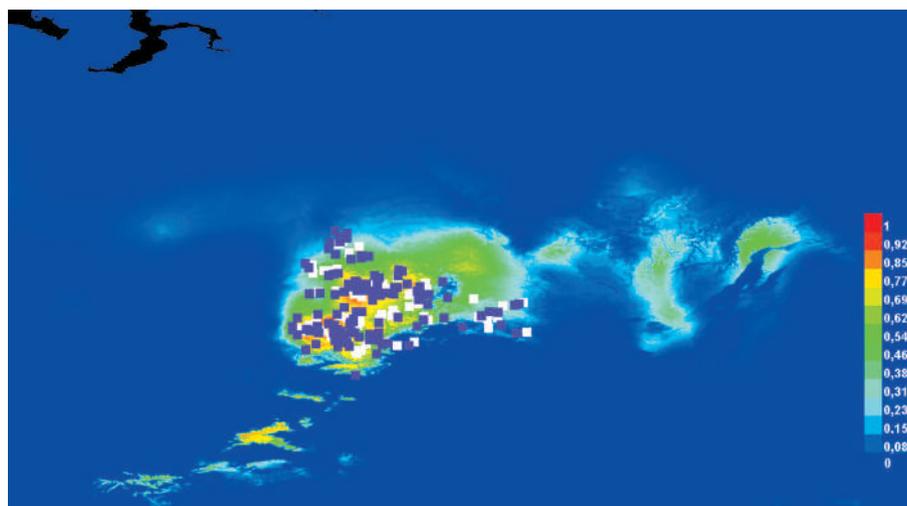


Рис. 1. Распределение пригодных местообитаний *E. sibiricum* по результатам климатического моделирования по параметрам WorldClim: BIO3, 14, 7 и 18. Карта представлена в диапазоне координат: 40–70°N, 60–130°E. Точки обучающей выборки – белые, тестовой – фиолетовые квадраты. Качество модели по индексу пригодности местообитания таксона (AUC) указано на шкале, где 1 – отлично, 0 – очень плохо

Fig. 1. Forecast map of *E. sibiricum* distribution based on WorldClim climatic parameters: BIO3, 14, 7 and 18. The map is presented in the range of coordinates: 40–70°N, 60–130°E. The points of the training sample are white squares, the test sample is purple. The quality of the model in terms of taxon habitat suitability index (AUC) is indicated on a scale where 1 is excellent, 0 is very poor

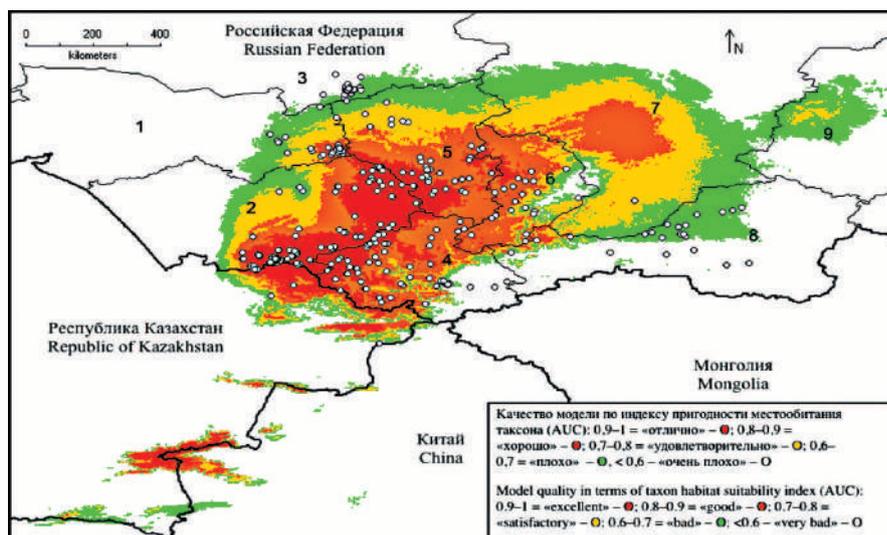


Рис. 3. Прогнозная карта распространения *E. sibiricum* на основе климатических параметров WorldClim по территории юга Сибири (БИО – 3, 14, 7 и 18) с точными данными распространения вида (локалитеты обозначены маркерами белого цвета). Субъекты Российской Федерации: 1 – Новосибирская область, 2 – Алтайский край, 3 – Томская область, 4 – Республика Алтай, 5 – Кемеровская область, 6 – Республика Хакассия, 7 – Красноярский край, 8 – Республика Тыва, 9 – Иркутская область

Fig. 3. Predictive map of *E. sibiricum* distribution based on WorldClim climatic parameters over the southern Siberia territory (BIO – 3, 14, 18 and 7) with accurate data on the species distribution (localities are indicated with white markers). The regions of the Russian Federation: 1 – Novosibirsk Region, 2 – Altai Territory, 3 – Tomsk Region, 4 – Republic of Altai, 5 – Kemerovo Region, 6 – Republic of Khakassia, 7 – Krasnoyarsk Territory, 8 – Republic of Tuva, 9 – Irkutsk Region

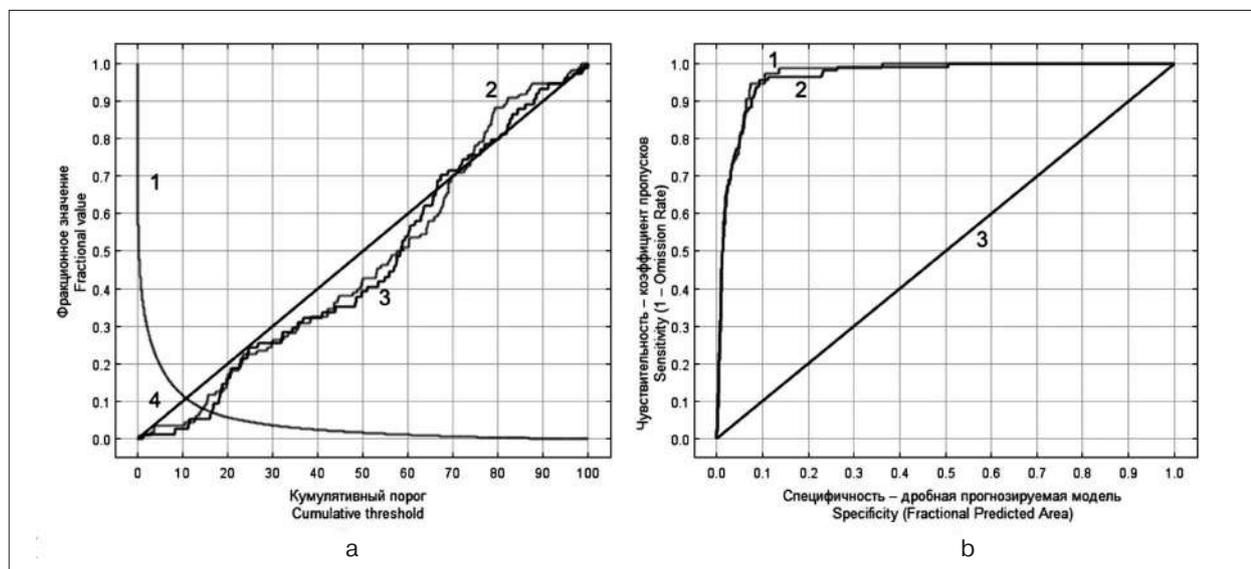


Рис. 2. Тестирование достоверности полученных данных для *E. sibiricum* (BIO3, 14, 7 и 18):
 а) 1 – исходные данные; 2 – тестовая выборка; 3 – обучающая выборка;
 4 – предсказанная эмиссия; б) 1 – обучающая выборка (AUC = 0,915); 2 – тестовая выборка
 (AUC = 0,966), 3 – случайное предсказание (AUC = 0,5)

Fig. 2. Testing of the reliability of the data obtained for *E. sibiricum* (BIO3, 14, 7 and 18):
 а) 1 – fraction of background predicted; 2 – omission on test samples;
 3 – omission on training samples; 4 – predicted omission; б) 1 – training date
 (AUC = 0.915); 2 – test date (AUC = 0.966); 3 – random prediction (AUC = 0.5)

тверждают надёжность прогноза модели, что свидетельствует об её достаточной ожидаемой способности.

Прогнозная модель по *E. sibiricum*, полученная в MaxEnt по четырём параметрам, была сгенерирована на карте в программе DIVA-GIS (рис. 3, см. цв. вкладку VIII). Эта карта также содержит данные о распространении *E. sibiricum* по 462 локалитетам по трансграничной территории юга Сибири, включающую территорию Алтае-Саянской горной страны.

Ценность новой опубликованной точки при таком «классическом» подходе зависит от её относительного положения. Как отмечалось ранее [34], если точка окажется внутри ареала, между другими точками, цена её очень невелика. Краевые находки «изменяют» наши представления об ареале, точнее о его «границах».

Заключение

В ходе проведения исследования уточнён ареал вида *E. sibiricum* и определена территория пригодности местообитаний – в пределах координат 48–57° N и 82–94° E. Прогнозная модель *E. sibiricum* узко локализована, преимущественно по границам повторяет современный ареал вида за исключением юга Восточного Казахстана. Так, результаты климатического моделирования указывают на высокое

значение вероятностного местонахождения *E. sibiricum* на территории Джунгарского Алатау (рис. 3, см. цв. вкладку VIII). При этом согласно данным флоры Джунгарского Алатау [37] и Красной книги Казахстана [22], пока не было подтверждённых сведений о местонахождении *E. sibiricum* на данной территории, что требует дополнительных исследований.

В результатах проводимого моделирования учитываются только климатические факторы, в анализ модели не включены данные о вероятностном нахождении с учётом конкурентных способностей вида, взаимосвязей компонентов сообщества, особенностей рельефа и показателей состояния почвы. Отдельно следует указать на один из самых важных экологических факторов, способствующих произрастанию *E. sibiricum* – приуроченность к лесному комплексу тёмнохвойной тайги и широколиственных лесов (берёза, осина), где он встречается на опушках и осветлённых местах. Следовательно, для устойчивого сохранения современных границ ареала *E. sibiricum* важно поддержание лесного фонда пихтово-кедровых, елово-кедровых, пихтовых лесов и березняков. Данное исследование, безусловно, вносит вклад в развитие системы мониторинга растительности [38].

Климатическое моделирование состояния *E. sibiricum* показало практически рав-

ное влияние температуры (46,4%) и осадков (41,8%) как факторов, сдерживающих расширение ареала вида. Данные выводы коррелируют с распространением *E. sibiricum* в пределах климатических зон [29], где благоприятными являются области с тёплым летом без сухого сезона и с сухой зимой, а сдерживающими – холодный климат без сухого сезона с холодным летом на севере и холодным степным и пустынным климатом на юге. При том, что вид демонстрирует достаточно широкую экологическую амплитуду, ему свойственны низкий коэффициент вегетативного размножения и слабая семенная продуктивность, что становится дополнительным сдерживающим фактором его распространения.

Исследование выполнено за счёт гранта Российской государственной академии наук (проект № 22-24-20002, <https://rscf.ru/project/22-24-20002/>).

Литература

1. Araújo M.B., Peterson A.T. Uses and misuses of bioclimatic envelope modeling // *Ecology*. 2012. V. 93. No. 7. P. 1527–1539.
2. Лисовский А.А., Дудов С.В., Оболенская Е.В. Преимущества и ограничения методов экологического моделирования ареалов. 1. Общие подходы // *Журнал общей биологии*. 2020. Т. 81. № 2. С. 123–134.
3. Лисовский А.А., Оболенская Е.В. Исследование ареалов мелких млекопитающих Юго-восточного Забайкалья методом моделирования экологической ниши // *Журнал общей биологии*. 2014. Т. 75. № 5. С. 353–371.
4. Guisan A., Zimmermann N.E. Predictive habitat distribution models in ecology // *Ecological Modelling*. 2000. V. 135. P. 147–186.
5. Anderson R.P., Lew D., Peterson A.T. Evaluating predictive models of species' distributions: criteria for selecting models // *Ecological Modelling*. 2003. V. 162. P. 211–232.
6. Phillips S.J., Anderson R.P., Schapire R.E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions // *Ecological Modelling*. 2006. V. 190. P. 231–259.
7. Phillips S.J., Dudik M. Modeling of species distributions with MaxEnt: new extensions and a comprehensive evaluation // *Ecography*. 2008. V. 31. P. 161–175.
8. Elith J., Phillips S.J., Hastie T., Dudik M., Chee Y.E., Yates C.J. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists // *Diversity and Distributions*. 2011. V. 17. P. 43–57.
9. Олонова М.В., Гао Х. Потенциальные возможности распространения адвентивного растения *Poa compressa* L. в Сибири // *Вестник Томского государственного университета. Биология*. 2014. Т. 4. № 28. С. 56–69.
10. Санданов Д.В., Найданов Б.Б. Пространственное моделирование ареалов Восточно-азиатских видов растений: современное состояние и динамика под влиянием климатических изменений // *Растительный мир Азиатской России*. 2015. № 3 (19). С. 30–35.
11. Dudov S.V. Modeling of species distribution with the use of topography and remote sensing data on the example of vascular plants of the Tukuringra Ridge low mountain belt (Zeya state nature reserve, Amur Oblast) // *Biology Bulletin Reviews*. 2016. V. 77. No. 7. P. 246–257.
12. Korznikov K.A. Climate envelope models of *Kalopanax septemlobus* and *Phellodendron amurense* var. *sachalinense* in the insular part of the Russian Far East // *Biol Bull Russ Acad Sci*. 2019. V. 46. No. 6. P. 626–635.
13. Makunina N.I., Egorova A.V., Pisarenko O.Yu. Drawing of potential areas of plant communities for geobotanical zoning purposes (on example of Tuva forests) // *Contemp. Probl. Ecol*. 2020. V. 13. No. 4. P. 412–417.
14. Merow C., Smith M.J., Silander J.A. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: What it does, and why inputs and settings matter // *Ecography*. 2013. V. 36. No. 10. P. 1058–1069.
15. Elith J., Phillips S.J., Hastie T., Dudik M., Chee Y.E., Yates C.J. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists // *Diversity and Distributions*. 2011. V. 17. P. 43–57.
16. Уиттекер Р. Сообщества и экосистемы. М.: Прогресс, 1980. 327 с.
17. Вальтер Г. Общая геоботаника. М.: Мир, 1982. 261 с.
18. Chen I.-C., Hill J.K., Ohlemüller R., Roy D.B., Thomas C.D. Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming // *Science*. 2011. V. 333. P. 1024–1026.
19. Elton C.S. The ecology of invasions by animal and plants. London: Methuen, 1958. 181 p.
20. Москаленко Г.П. Оценка потенциальной опасности адвентивных видов для ландшафтов // *Экологическая безопасность и инвазии чужеродных организмов: сборник материалов Круглого стола «Всероссийской конференции по экологической безопасности России»*. М.: ИПЭЭ имени А.Н. Северцова, IUCN (МСОП), 2002. С. 94–104.
21. Седельникова Л.Л. Кандык сибирский: Биология, распространение, использование. Новосибирск: Издательство СО РАН, филиал «Гео», 2018. 102 с.
22. Красная книга Казахстана. Т. 2: Растения. Астана: АртПринтXXI, 2014. 452 с.
23. Rare endangered endemic higher plants in Xinjiang of China. CIP, 2006. 159 p.
24. Седельникова Л.Л. Особенности биоморфы *Erythronium sibiricum* (Fisch. et C.F. Mey.) Kryl. // *Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии: сборник научных статей по материалам XII международной научно-практической конференции*. Барнаул: Издательство АлтГУ, 2013. С. 96–99.

25. Седельникова Л.Л. Ареал и местообитание *Erythronium sibiricum* (Fisch. et Mey.) Kryl. // Декоративные растения и их интродукция в Западную Сибирь. Новосибирск: Наука, 1977. С. 73–76.
26. Флора Сибири. Т. 4. Araceae – Orchidaceae. Новосибирск: Наука, 1987. 248 с.
27. Каташ С.С., Крюков А.С., Чечегова Е.В. Горно-Алтайская автономная область. Горно-Алтайск: Областное книжное издательство, 1963. 123 с.
28. Шумилова Л.В. Ботаническая география Сибири. Томск: ТГУ, 1962. 439 с.
29. Peel M.C., Finlayson B.L., McMahon T.A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification // Hydrology and Earth System Sciences. 2007. V. 11. P. 1633–1644.
30. GBIF – Global Biodiversity Information Facility GBIF Occurrence Download [Электронный ресурс] <https://doi.org/10.15468/dl.rbuscy9> (Дата обращения: 15.01.2021).
31. Brown J.L. SDMtoolbox: a python-based GIS toolkit for landscape genetic, biogeographic and species distribution model analyses // Methods in Ecology and Evolution. 2014. V. 5. No. 7. P. 694–700.
32. Phillips S.J., Dudik M., Schapire R.E. Maxent software for modeling species niches and distributions (Version 3.4.1) [Электронный ресурс] http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/ (Дата обращения: 11.12.2020).
33. WorldClim. Maps, graphs, tables, and data of the global climate [Электронный ресурс] <https://www.worldclim.org> (Дата обращения: 15.01.2021).
34. Лисовский А.А., Дудов С.В. Преимущества и ограничения методов экологического моделирования ареалов. 2. MaxEnt // Журнал общей биологии. 2020. Т. 81. № 2. С. 135–146.
35. Austin M. Species distribution models and ecological theory: A critical assessment and some possible new approaches // Ecological Modelling. 2007. V. 200. P. 1–19.
36. Araújo M.B., Pearson R.G., Thuiller W., Erhard M. Validation of species-climate impact models under climate change // Glob. Change Biol. 2005. V. 11. No. 9. P. 1504–1513.
37. Голоскоков В.П. Флора Джунгарского Алатау (Конспект и анализ). Алма-Ата: Наука, 1984. 224 с.
38. Домнина Е.А., Адамович Т.А., Тимонов А.С., Ашихмина Т.Я. Изучение лесовосстановления по космическим снимкам высокого разрешения // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 3. С. 38–43.
39. distribution modeling methods. 1. A general approach // Biology Bulletin Reviews. 2020. V. 81. No. 2. P. 123–134 (in Russian). doi: 10.31857/S0044459620020037
40. Lissovsky A.A., Obolenskaya E.V. A study of the distribution ranges of small mammals from South-Eastern Transbaikalia with ecological niche modeling methods // Biology Bulletin Reviews. 2014. V. 75. No. 5. P. 353–371 (in Russian).
41. Guisan A., Zimmermann N.E. Predictive habitat distribution models in ecology // Ecological Modelling. 2000. V. 135. P. 147–186. doi: 10.1016/S0304-3800(00)00354-9
42. Anderson R.P., Lew D., Peterson A.T. Evaluating predictive models of species' distributions: criteria for selecting models // Ecological Modelling. 2003. V. 162. P. 211–232. doi: 10.1016/S0304-3800(02)00349-6
43. Phillips S.J., Anderson R.P., Schapire R.E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions // Ecological Modelling. 2006. V. 190. P. 231–259. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026
44. Phillips S.J., Dudik M. Modeling of species distributions with MaxEnt: new extensions and a comprehensive evaluation // Ecography. 2008. V. 31. P. 161–175. doi: 10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x
45. Elith J., Phillips S.J., Hastie T., Dudik M., Chee Y.E., Yates C.J. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists // Diversity and Distributions. 2011. V. 17. P. 43–57. doi: 10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x
46. Olova M.V., Gao X. Potential possibilities of spreading the adventive plant *Poa compressa* L. in Siberia // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya (Tomsk State University Journal of Biology). 2014. V. 4. No. 28. P. 56–69 (in Russian). doi: 10.17223/19988594/28/4
47. Sandanov D.V., Naidanov B.B. Spatial modeling of East Asian plant species distributions: current condition and future dynamic under climatic changes // Rastitelnyy mir Aziatskoy Rossii (Flora and Vegetation of Asian Russia). 2015. No. 3 (19). P. 30–35 (in Russian).
48. Dudov S.V. Modeling of species distribution with the use of topography and remote sensing data on the example of vascular plants of the Tukuringra Ridge low mountain belt (Zeya state nature reserve, Amur Oblast) // Biology Bulletin Reviews. 2016. V. 77. No. 7. P. 246–257. doi: 10.1134/S2079086417030021
49. Korznikov K.A. Climate envelope models of *Kalopanax septemlobus* and *Phellodendron amurense* var. *sachalinense* in the insular part of the Russian Far East // Biol Bull Russ Acad Sci. 2019. V. 46. No. 6. P. 626–635. doi: 10.1134/S1062359019040083
50. Makunina N.I., Egorova A.V., Pisarenko O.Yu. Drawing of potential areas of plant communities for geobotanical zoning purposes (on example of Tuva forests) // Contemp. Probl. Ecol. 2020. V. 13. No. 4. P. 412–417. doi: 10.1134/S1995425520040095
51. Merow C., Smith M.J., Silander J.A. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: What

References

- it does, and why inputs and settings matter // *Ecography*. 2013. V. 36. No. 10. P. 1058–1069. doi: 10.1111/j.1600-0587.2013.07872.x
15. Elith J., Phillips S.J., Hastie T., Dudik M., Chee Y.E., Yates C.J. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists // *Diversity and Distributions*. 2011. V. 17. P. 43–57. doi: 10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x
16. Whittaker R. *Communities and ecosystems*. Moskva: Progress, 1980. 327 p. (in Russian).
17. Walter G. *General geobotany*. Moskva: Mir, 1982. 261 p. (in Russian).
18. Chen I.-C., Hill J.K., Ohlemüller R., Roy D.B., Thomas C.D. Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming // *Science*. 2011. V. 333. P. 1024–1026. doi: 10.1126/science.1206432
19. Elton C.S. *The ecology of invasions by animal and plants*. London: Methuen, 1958. 181 p.
20. Moskalenko G.P. Assessment of the potential danger of adventive species for landscapes // *Environmental safety and invasions of alien organisms “Collection of materials of the Round table of the All-Russian conference on environmental safety of Russia”*. Moskva: IPEE imeni A.N. Severtsova, IUCN (MCOII), 2002. P. 94–104 (in Russian).
21. Sedelnikova L.L. *Siberian fawnlily lily: Biology, distribution, use*. Novosibirsk: Publishing house of the SB RAS, branch “Geo”, 2018. 102 p. (in Russian). doi: 10.21782/B978-5-9909584-6-3
22. *Red Book of Kazakhstan. V. 2. Rasteniya*. Astana: ArtPrintXXI, 2014. 452 p. (in Russian).
23. *Rare endangered endemic higher plants in Xinjiang of China*. CIP, 2006. 159 p.
24. Sedelnikova L.L. Features of the biomorph of *Erythronium sibiricum* (Fisch. Et C.F. Mey.) Kryl. // *Problems of botany of Southern Siberia and Mongolia: collection of scientific articles based on the materials of the XII international scientific-practical conference*. Barnaul: Altai State University Publishing House, 2013. P. 96–99 (in Russian).
25. Sedelnikova L.L. Range and habitat of *Erythronium sibiricum* (Fisch. Et Mey.) Kryl. // *Ornamental plants and their introduction to Western Siberia*. Novosibirsk: Nauka, 1977. P. 73–76 (in Russian).
26. *Flora of Siberia. V. 4. Araceae – Orchidaceae*. Novosibirsk: Nauka, 1987. 248 p. (in Russian).
27. Katash S.S., Kryukov A.S., Chechegoeva E.V. *Gorno-Altai Autonomous Region. Gorno-Altaysk: Oblastnoe knizhnoe izdatelstvo*, 1963. 123 p. (in Russian).
28. Shumilova L.V. *Botanical geography of Siberia*. Tomsk: TGU, 1962. 439 p. (in Russian).
29. Peel M.C., Finlayson B.L., McMahon T.A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2007. V. 11. P. 1633–1644. doi: 10.5194/hess-11-1633-2007
30. GBIF – Global Biodiversity Information Facility. GBIF Occurrence Download [Internet resource] <https://doi.org/10.15468/dl.rbycy9> (Accessed: 15.01.2021).
31. Brown J.L. SDMtoolbox: a python-based GIS toolkit for landscape genetic, biogeographic and species distribution model analyses // *Methods in Ecology and Evolution*. 2014. V. 5. No. 7. P. 694–700. doi: 10.1111/2041-210X.12200
32. Phillips S.J., Dudik M., Schapire R.E. Maxent software for modeling species niches and distributions (Version 3.4.1) [Internet resource] http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/ (Accessed: 11.12.2020).
33. WorldClim. Maps, graphs, tables, and data of the global climate [Internet resource] <https://www.worldclim.org> (Accessed: 15.01.2021).
34. Lissovsky A.A., Dudov S.V. Advantages and limitations of application of the species distribution modeling methods. 2. MaxEnt // *Biology Bulletin Reviews*. 2020. V. 81. No. 2. P. 135–146 (in Russian). doi: 10.31857/S0044459620020049
35. Austin M. Species distribution models and ecological theory: A critical assessment and some possible new approaches // *Ecological Modelling*. 2007. V. 200. P. 1–19. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2006.07.005
36. Araújo M.B., Pearson R.G., Thuiller W., Erhard M. Validation of species-climate impact models under climate change // *Glob. Change Biol.* 2005. V. 11. No. 9. P. 1504–1513. doi: 10.1111/j.1365-2486.2005.01000.x
37. Goloskokov V.P. *Flora of the Dzungarian Alatau (summary and analysis)*. Almaty: Nauka, 1984. 224 p. (in Russian).
38. Domnina E.A., Adamovich T.A., Timonov A.S., Ashikhmina T.Ya. Reforestation study based on high resolution satellite imagery // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 3. P. 38–43 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-038-043

Corporate carbon management system

© 2023. E. V. Karanina¹ ORCID: 0000-0002-5439-5912, N. N. Ilysheva² ORCID: 0000-0002-7876-9376,
E. V. Baldesku³ ORCID: 0000-0002-7876-9376, A. F. Toporkova⁴ ORCID: 0000-0002-7876-9377

¹Vyatka State University,

36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

²Ural Federal University named after the first President
of Russia B. N. Yeltsin,

19, Mira St., Yekaterinburg, Russia, 620002,

³JSC “VNIIneft named after Academician A. P. Krylov”,
10, Dmitrovsky Proezd, Moscow, Russia, 127422,

⁴JSC “Zarubezhneft”,

9, Armyansky Pereulok, Moscow, Russia, 101000,

e-mail: karanina@vyatsu.ru, elena.baldesku@yandex.ru

The basis of the company’s decarbonization is the effective management of greenhouse gas emissions. The article visualizes in graphic material the forecast values of the mass of greenhouse gas emissions in the fuel and energy sector of Russia until 2030 and determines the trends in their changes. Based on the results of the analysis, it was revealed that in order to achieve a low-carbon development path, it is necessary to introduce additional measures to reduce greenhouse gas emissions. The purpose of the scientific research is to develop a corporate carbon management system, which can become a guideline for the development of corporate systems by Russian oil and gas companies.

A reliable system for recording and monitoring greenhouse gas emissions serves as the basis for obtaining up-to-date, complete and reliable data. At the same time, for the quality control of the decarbonization process, a scheme of interaction within the company should be clearly built. The development and implementation of a carbon management system will allow the company to systematically reduce greenhouse gas emissions, which will create conditions for the transformation of climate risks associated with government regulation into the category of opportunities such as entering carbon markets, attracting investors, etc. The authors note that in most large Russian companies have already developed and introduced carbon management systems into production.

After analyzing the current greenhouse gas accounting system of JSC “Zarubezhneft”, the authors propose to create a carbon management system taking into account the specifics of the company, which consists in organizing activities on the territory of different countries (Cuba, Bosnia and Herzegovina, Egypt, Uzbekistan, Indonesia, Vietnam and Russia). It is proposed to adapt the methodological approaches for calculating greenhouse gas emissions to the requirements of the legislation in force in the territory where the production facilities of the JSC “Zarubezhneft” are located, and also to apply national coefficients in the calculation to ensure more accurate emission estimates.

The result of the study is the development of the concept of the carbon management system of JSC “Zarubezhneft”.

Keywords: emissions management, greenhouse gases, decarbonization, climate change, sustainable development.

УДК 502.3/.7

Корпоративная система углеродного менеджмента

2023. Е. В. Каранина¹, д. э. н., профессор, зав. кафедрой,
Н. Н. Ильшева², д. э. н., профессор,
Е. В. Балдеску³, к. э. н., гл. специалист НТЦ,
А. Ф. Топоркова⁴, руководитель центра компетенций ESG,

¹Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

²Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина,
620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19,

³АО «ВНИИнефть им. академика А.П. Крылова»,
127422, Россия, г. Москва, пр-д Дмитровский, д. 10,
⁴АО «Зарубежнефть»,
101000, Россия, г. Москва, Армянский пер., д. 9,
e-mail: karanina@vyatsu.ru, elena.baldesku@yandex.ru

Основой декарбонизации компании является эффективное управление выбросами парниковых газов. В статье визуализированы в графический материал прогнозные значения массы выбросов парниковых газов в топливно-энергетическом секторе России до 2030 г. и определены тенденции их изменений. По результатам анализа выявлено, что для достижения низкоуглеродного пути развития необходимо введение дополнительных мер по снижению выбросов парниковых газов. Цель научного исследования заключается в разработке корпоративной системы углеродного менеджмента АО «Зарубежнефть», которая может стать ориентиром для разработки корпоративных систем российскими нефтегазовыми компаниями.

Надёжная система учёта и мониторинга выбросов парниковых газов служит основой для получения актуальных, полных и достоверных данных. При этом для качественного контроля процесса декарбонизации должна быть чётко выстроена схема взаимодействия внутри компании. Разработка и внедрение системы углеродного менеджмента позволит компании планомерно сокращать выбросы парниковых газов, что создаст условия для трансформации климатических рисков, связанных с государственным регулированием, в категорию таких возможностей как выход на углеродные рынки, привлечение инвесторов и др. Авторы отмечают, что в большинстве крупных российских компаний уже разработаны и внедрены в производство системы углеродного менеджмента.

Проанализировав действующую систему учёта парниковых газов ГК «Зарубежнефть», авторами предлагается создать систему углеродного менеджмента с учётом специфики компании, заключающейся в организации деятельности на территории разных стран (Куба, Босния и Герцеговина, Египет, Узбекистан, Индонезия, Вьетнам и Россия). Предлагается адаптировать методические подходы по расчёту выбросов парниковых газов к требованиям законодательства, действующего на территории расположения производственных объектов ГК «Зарубежнефть», а также при расчёте применять национальные коэффициенты для обеспечения более точных оценок эмиссии.

Результатом исследования является разработка концепции системы углеродного менеджмента ГК «Зарубежнефть».

Ключевые слова: управление выбросами, парниковые газы, декарбонизация, изменение климата, устойчивое развитие.

Human activities create 18 gigatonnes of carbon emissions each year in the fast carbon cycle (biosphere, hydrosphere, atmosphere) that are not absorbed by the oceans and land cover, thereby upsetting the balance in the geochemical carbon cycle [1].

Global baseline emissions of greenhouse gases (GHG) are projected to be seven times the level needed to keep global warming below 1.5 C by 2050 [2]. At the same time, according to the results of a number of scientific studies, the oil and gas industry will account for up to 25% of the total emissions [3]. Today, shareholders, financial institutions and regulators are increasing pressure on enterprises that do not meet the requirements for reducing GHG emissions, including taking on obligations to reduce emissions, worsening financing conditions and excluding assets from investment portfolios [4].

Projected scenarios for GHG emissions from the fuel and energy complex of the Russian Federation, taking into account the implementation of decarbonization measures for the period up to 2030, are presented in Figure.

Total GHG emissions from the fuel and energy complex of the Russian Federation are grouped into two scenarios according to the

criteria “with measures” (regulatory legal acts and sectoral strategic planning documents provide for both market (tax and tariff) and administrative regulatory measures) and “with additional measures” (measures to absorb and reduce greenhouse gas emissions, such as increasing the absorptive capacity of managed ecosystems). The transition to a “low-carbon” path of development is possible only with the implementation of additional measures, i. e., according to the second scenario (Fig.).

Thus, in order to switch to the path of low-carbon development on a national scale, it is necessary to implement additional measures [7].

The main objective of the national policy in the field of climate change mitigation is the creation of effective carbon management systems that allow setting goals and achieving results in reducing greenhouse gas emissions [8].

Objects and methods of research

The object of the study is the integrated oil and gas company JSC “Zarubezhneft”. Based on the analysis of the historical stages of development of the current greenhouse gas emission accounting system and the company’s existing

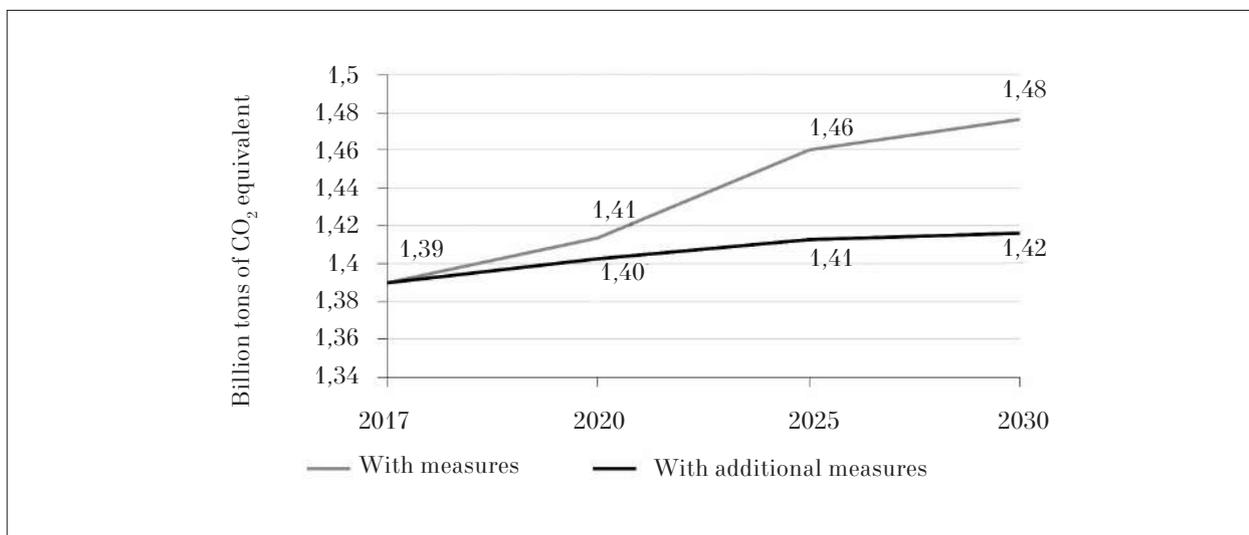


Fig. Greenhouse gases emissions in the fuel and energy complex of the Russian Federation (forecast values) [6]

experience in this area, priority areas for the development of a carbon management system in modern conditions were identified.

Using methods of the theoretical level (analysis, analogy, etc.), the concept of the corporate carbon management system of JSC “Zarubezhneft” was developed and recommendations were proposed for the development of corporate guidelines for the quantitative determination of greenhouse gas emissions, taking into account the specifics of the company, which consists in organizing activities on the territory of different countries.

Analysis of the stages of development of the current greenhouse gas emission accounting system of JSC “Zarubezhneft”

JSC “Zarubezhneft” shares the goals and objectives of the Strategy for the Social and Economic Development of the Russian Federation with Low Greenhouse Gas Emissions until 2050 and recognizes the importance of addressing climate change challenges in the context of sustainable and responsible business, taking into account the main trends in regulation in the field of GHG emissions and combating climate change in the regions of presence and in the main sales markets [9].

In connection with the development in the Russian Federation of a system for monitoring, reporting and verifying the volume of anthropogenic greenhouse gas emissions, JSC “Zarubezhneft” has been working since 2014 to develop a system for accounting for greenhouse gas emissions. Since 2014, the Instruction on the

procedure for preparing and submitting initial data for calculating greenhouse gas emissions has been put into effect. Since 2015, the calculation of the level of greenhouse gas emissions by the production assets of the Russian segment has been carried out.

In 2022, in order to develop and implement the decarbonization action plan, a centralized resource was created on the basis of the corporate center to coordinate efforts at all levels of the company, support work on the preparation of measures and their preliminary assessment. Work is underway to form a functional strategy for sustainable development and decarbonization of the company.

In the same year, work began on the development of a carbon management system. For all assets of the company, an inventory of greenhouse gas emissions was carried out, a base year was determined, and the carbon footprint of products was calculated. The assessment was made for three scopes: direct emissions (scope 1), indirect energy emissions (scope 2) and other indirect emissions (scope 3). The results obtained will be analyzed to set targets for achieving the company’s low-carbon development model.

In 2023, it is planned to develop a regulation and scheme for interaction between enterprises and divisions of JSC “Zarubezhneft” on carbon management and decarbonization of the company.

In the same year, it is planned to automate accounting for greenhouse gas emissions – as part of the development of the operational monitoring center system, a section on accounting for greenhouse gas emissions is being prepared for

launch. The data in the information system will be updated on a monthly basis.

JSC “Zarubezhneft” also implements measures and programs for the development and implementation of renewable energy sources in the regions of its presence.

In addition to the development of renewable energy sources, JSC “Zarubezhneft” is implementing a gas program for the rational use of associated petroleum gas. Its main goal is to reduce the negative impact on the environment by increasing the use of associated petroleum gas and reducing the volume burned at flares.

Another measure aimed at reducing greenhouse gas emissions is to increase the company’s energy efficiency. This program is based on the rational use of lighting, the use of energy-efficient electric motors, the use of emergency heating in administrative buildings, raising awareness of employees about the need to save electricity and fuel in the production process, etc.

Consistent and full-fledged implementation of these programs has become the basis for creating a common strategy in the field of sustainable development and decarbonization of the activities of individual assets and the company as a whole.

The concept of the carbon management system of JSC “Zarubezhneft”

A company’s carbon management system should include three main elements: inventory, strategy and monitoring [10]. At the same time, the inventory of greenhouse gas emissions is the central element of the system. Based on the base year inventory data, targets are set to reduce greenhouse gas emissions [11].

Inventory. During the inventory process, the company defines organizational boundaries. The purpose of this stage is to form a list of sources that are under the operational control of the company [12].

To determine the current level of greenhouse gas emissions, both the calculation method and the instrumental one can be used. Quantification methods should provide a minimum level of error. At the same time, countries approve their own emission factors at the national level. Taking into account the peculiarities of the organization of JSC “Zarubezhneft” activities in different countries, in order to minimize the error, it is proposed to adapt national methodological approaches to the calculation of greenhouse gas emissions of Russian and foreign assets. At the same time, in order to publish the consolidated results of

calculations of GHG emissions, a unified approach based on international methodological documents should be adopted [13].

Based on the results of the inventory, a register of greenhouse gas emissions is compiled, on the basis of which targets are set to reduce greenhouse gas emissions [14].

Carbon reporting is prepared in accordance with the requirements of the law and reflects the results achieved by the company in reducing greenhouse gas emissions [15].

Monitoring of GHG emissions is intended to update the emission register. Through monitoring, the status of implementation of measures to reduce greenhouse gas emissions is controlled and their effectiveness is assessed [16].

The collection, processing and storage of data are regulated by the relevant corporate documents. To automate the accounting of greenhouse gas emissions, an information system can be provided in the company. JSC “Zarubezhneft” plans to launch a section for monitoring greenhouse gas emissions as part of the development of the operational monitoring center system.

Data control and management procedures are designed to control the quality of the greenhouse gas register and should be integrated into the corporate governance system [17].

The strategy of sustainable development and decarbonization ensures that the goals and activities of the company are in line with the main directions of state policy in the field of reducing greenhouse gas emissions. To effectively manage emissions, the company defines a base year and sets targets based on the emissions forecast [18].

To achieve the goals of the strategy, an action plan is developed and implemented to reduce greenhouse gas emissions [19], which may include measures aimed at introducing renewable energy sources and increasing energy efficiency, implementation of forest climate projects [20].

The concept of the carbon management system of JSC “Zarubezhneft” is shown in Figure 2.

The carbon management system allows, under changing conditions, to evaluate options for managing greenhouse gas emissions and make the most effective decision to achieve the goals [21].

Development of corporate guidelines for the quantitative determination of greenhouse gas emissions

One of the important tasks in the development of corporate guidelines for the quantifica-

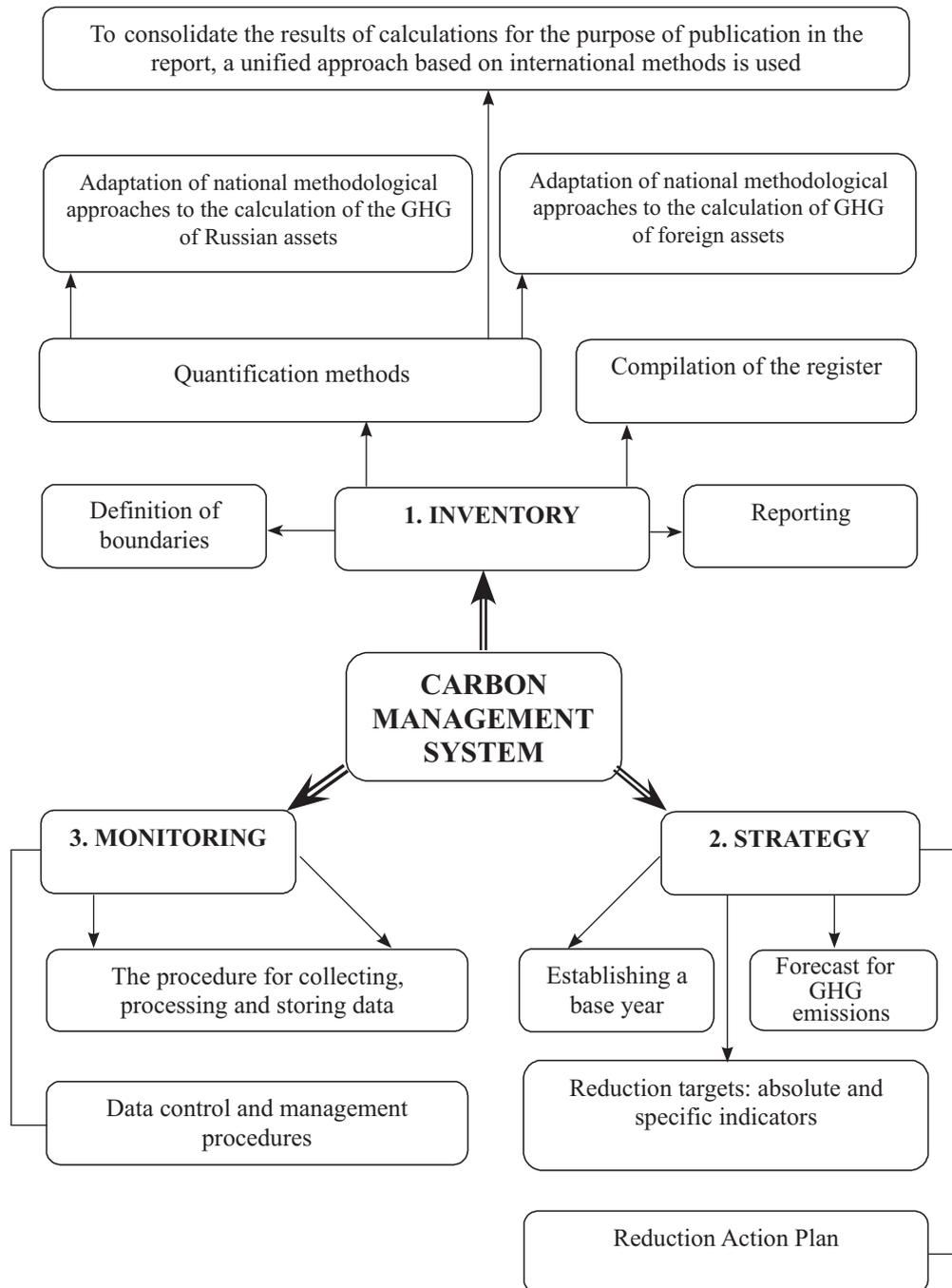


Fig. 2. The concept of the carbon management system of JSC “Zarubezhneft”

tion of GHG emissions for a company with a presence in different countries is to ensure the compatibility of guidelines with national inventory methodologies [22].

The purpose of developing corporate guidelines is to adapt national methodologies for calculating GHG emissions to the operating conditions of subsidiaries located both in the Russian Federation and in foreign countries [23].

When developing corporate guidelines, Russian methodological documents (Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation of May 27, 2022 No. 371, Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation of June 29, 2017 No. 330) and international methodological documents (IPCC Guidelines, GHG Protocol), since these documents describe in detail the calculations of GHG emissions by the main categories of the

inventory, as well as national methodological documents that are in force in the territories of the countries where the company operates [24]. Methodological guidelines should take into account the calculations of all types of GHGs, regulated by national regulations in the countries where the company operates [25].

For the storage and operational use of data, the guidelines should provide for forms and periods of reporting with the appointment of responsible persons. Reporting forms should be designed with internal use in mind, and should also include reporting at the state level [26].

Due to the all-Russian trend towards digitalization and import substitution of foreign software, guidelines should include not only a detailed description of the quantitative calculation procedures with indication of regulatory documents, but also a description of business processes for further correct integration into the already existing model for monitoring oil and gas production processes [27]. The purpose of this model is the online monitoring mode. Greenhouse gases emissions in this system are an integral part of the overall process [28].

To adapt the developed corporate guidelines to the national conditions of the countries where the company operates, as well as for ease of use, they may additionally include: 1) available national energy coefficients; 2) IPCC default coefficients; 3) GHG types regulated for calculation by national regulatory documents; 4) nationally accepted global warming potentials; 5) rules and procedures for internal audits (including reconciliation of information from documents with data from metering devices).

Guidelines should be systematized, set out as simply and clearly as possible. Recommended methods should be substantiated by references to a regulatory and prescriptive document.

Conclusion

Commitment to the goals of low-carbon development and presentation of the results of its activities in terms of the scale of the impact on the climate and the reduction of greenhouse gas emissions are the most important tasks for achieving carbon neutrality.

The introduction of a carbon management system will allow the company to apply a unified approach to managing greenhouse gas emissions, monitor the effectiveness of measures to reduce emissions, including the use of both internal reserves (energy efficiency measures, implementation of climate projects, carbon cap-

ture utilization and storage projects – CCUS) and external opportunities (entry into carbon markets, work with suppliers), adapt to climate change and build effective interaction with government agencies and stakeholders.

Based on the results of the analysis of the current greenhouse gas emission accounting system, the concept of the carbon management system of JSC “Zarubezhneft” was proposed, taking into account the specifics of the company, which consists in organizing activities on the territory of different countries

The article was prepared with the support of the grant of the President of the Russian Federation NSh-5187.2022.2 for state support of young Russian scientists and state support for leading scientific schools of the Russian Federation within the framework of the research topic “Development and justification of the concept, an integrated model of resilience – diagnosing risks and threats to the security of regional ecosystems and technology of its application based on the digital twin”.

References

- Hill L.B., Li X.C., Wei N. CO₂-EOR in China: A comparative review // International Journal of Greenhouse Gas Control [Internet resource] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1750583620305983> (Accessed: 28.02.2023). doi: 10.1016/j.ijggc.2020.103179
- Cooney G., Littlefield J., Marriott J., Skone T. Evaluating the climate benefits of CO₂-Enhanced oil recovery using life cycle analysis // Environ. Sci. Technol. [Internet resource] <http://acs.est.5b00700> (Accessed: 03.01.2023). doi: 10.1021/acs.est.5b00700
- CNPC Oil Provinces Summary [Internet resource] <http://www.cnpc.com.cn/en/operatediol/201405/2a55baf2e8a9420187880810fe91728f.shtml> (Accessed: 28.02.2023).
- Corporate development strategy of JSC “Zarubezhneft” 2021–2030. Moskva: Izdatelstvo VES MIR, 2020. P. 33–39 (in Russian).
- Zagirova S.V., Mikhailov O.A. Seasonal changes in the concentration and net exchange of CO₂ in the ecosystem of the spruce forest of the middle taiga subzone // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 3. P. 226–234 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-226-234
- Fourth Biennial Report of the Russian Federation submitted in accordance with Decision 1/CP.16 of the Conference of the Parties to the UNFCCC [Internet resource] https://unfccc.int/sites/default/files/resource/10469275_Russian%20Federation-BR4-1-4BR_RUS.pdf (Accessed: 02.11.2022).

7. Mayorova T.V., Belik I.S. Efficiency of environmental management in the context of the development of a low-carbon economy // *Economics and Entrepreneurship*. 2015. No. 12–2 (65). P. 1147–1152 (in Russian).
8. Mayorova T.V. The possibility of evaluating the effectiveness of environmental management by elements of non-financial reporting // *Economics and Entrepreneurship*. 2015. No. 11–1 (64). P. 646–650 (in Russian).
9. Annual report “Competencies of Success” for 2019 of JSC “Zarubezhneft” [Internet resource] https://www.zarubezhneft.ru/ru/ustoichivoe_razvitie/ (Accessed: 01.02.2023).
10. Belik I.S., Maiorova T.V. Indicators of environmental performance and energy efficiency of businesses under the low-carbon economy development // *Advances in Computer Science Research*. 2016. V. 51. P. 426–430.
11. Pakhomova N., Endres A., Richter K. Environmental management. Sankt-Peterburg: Peter, 2003. 544 p. (in Russian).
12. Saldaeva E.Yu., Fedyukov V.I. Fundamentals of the audit of the quality management system. Yoshkar-Ola: Volga State Technological University, 2022. 102 p. (in Russian).
13. Global Carbon Atlas [Internet resource] <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions> (Accessed: 01.03.2023).
14. Strukova M.N., Strukova L.V. Ecological management and audit. Yekaterinburg: Ural Federal University, 2016. 80 p. (in Russian).
15. Peters G.P. From production-based to consumption based national emission inventories // *Ecological Economics*. 2008. V. 65. No. 1. P. 13–23. doi: 10.1016/j.ecolecon.2007.10.014
16. Decarbonization in the oil and gas industry: international experience and Russian priorities / Eds. T. Mitrova, I. Gaida. Moskva: Energy Center of the Moscow School of Management Skolkovo, 2021. 158 p. (in Russian).
17. Soils and global change in the carbon cycle over geological time // Eds. H.D. Holland, K.K. Turekian. Oxford, 2004. 605 p.
18. Ayres U., Kneese A. Production, consumption and externalities // *American Economic Review*. 1969. No. 59. P. 282–297.
19. Wiedmann T. Editorial: carbon footprint and input-output analysis // *Economic Systems Research*. 2009. V. 21. No. 3. P. 175–186. doi: 10.1080/09535310903541256.
20. Gordeeva E.M., Vedernikova I.E. Forest climate projects in Russia: current legal support // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 2. P. 209–215. doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-209-215
21. Sosnina E.N., Masleeva O.V., Pachurin G.V. Comparative evaluation of options for solving the problem of greenhouse gases in the energy sector // *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2013. No. 3. P. 161–165 (in Russian).
22. Ilysheva N.N., Karanina E.V., Baldesku E.V., Zakirov U.Sh. Detection of the interdependence of economic development and environmental performance at the industry level // *Montenegrin Journal of Economy*. 2017. No. 4. P. 19–29. doi: 10.14254/1800-5845/2017.13-4-2
23. Ilysheva N.N., Karanina E.V., Baldesku E.V. Assessment of the applicability of methodological guidelines and guidelines for the quantitative determination of greenhouse gas emissions // *Earth and Environmental Science (EES)* [Internet resource] <http://esgmt2021.ru/index.php/ru/> (Accessed: 15.02.2023).
24. Ilysheva N.N., Karanina E.V., Baldesku E.V. Analysis of the factors of sustainable development of ecosystems in the territories of the North // *E3S Web of Conferences* [Internet resource] <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020808020> (Accessed: 23.02.2023).
25. Ilysheva N.N., Karanina E.V., Ledkov G.P., Baldesku E.V. The relationship of the components of sustainable development for the indigenous peoples of the North // *Economics and Management: Problems, Solutions*. 2020. No. 2 (8). P. 101–110 (in Russian). doi: 10.34684/ek.up.p.r.2020.08.02.014
26. EIA Atlas of Energy [Internet resource] <http://energyatlas.iea.org/#!/tellmap/1378539487> (Accessed: 01.03.2023).
27. Earth System Science [Internet resource] <http://www.earth-syst-sci-data.net/8/605/2016/> (Accessed: 20.12.2022).
28. Pystina N.B., Sharikhina L.V., Kosolapova E.V. Implementation of the roadmap for the greenhouse gas emission management system in Gazprom Group companies for the period up to 2030 // *Ecological safety in the gas industry (ESGI-2021): Sbornik materialov VII mezhdunarodnoy nauchno-practicheskoy konferentsii*. Moskva: Publishing house LLC “Research Institute of natural gases and gas technologies”, Gazprom VNIIGAZ, 2021. P. 43–44 (in Russian).

Юбилей Елены Валентиновны Дабах



16 сентября 2023 г. отмечает свой юбилей Елена Валентиновна Дабах – член редколлегии журнала «Теоретическая и прикладная экология». Область её научных интересов – почвоведение, биогеохимия, экология. После окончания факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова, а позднее и аспирантуры на кафедре химии почв МГУ под руководством доктора биологических наук, профессора Татьяны Алексеевны Соколовой она работала в Биолого-почвенном институте Дальневосточного отделения АН СССР (г. Владивосток). В 1989 г. успешно защитила кандидатскую диссертацию, посвящённую химико-минералогическому изучению почв Сихотэ-Алинского биосферного заповедника. В годы перестройки вернулась в г. Киров и работает старшим научным сотрудником лаборатории биомониторинга Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук и Вятского государственного университета. Её научные работы посвящены изучению почв Кировской области: их генезису, составу и свойствам, а также факторам почвообразования. Ряд работ касается вопросов экологии почв, оценки их загрязнения и реабилитации территорий. Результаты исследований Е.В. Дабах опубликованы в более чем 200 печатных работах, регулярно представляются на всероссийских и международных конференциях.

Классическое высшее образование и широкий спектр научных интересов позволяют Елене Валентиновне реализовать себя в разных областях деятельности. Помимо научной работы, за её плечами четвертьвековой успешный опыт преподавания наук о Земле (почвоведения, химии почв, основ геологии, геоэкологии) в вузах г. Кирова и многолетняя методическая работа со школьниками по программе «Шаг в будущее», большой опыт научно-организационной деятельности в качестве ответственного исполнителя по договорам с РосРАО, ООО «Гидроспецгеология», АО «ОХК «УРАЛХИМ», правительством Кировской области и др.

Елена Валентиновна неоднократно являлась членом экспертной комиссии по экологической оценке деятельности важнейших хозяйственных объектов Кировской области. Её отличает высокий профессионализм, глубокие знания и компетенции в почвоведении и смежных науках. Она всегда готова оказать консультационную, редакторскую помощь, дать ценные советы авторам по улучшению материалов рецензируемой ею статьи. Наряду с членами коллектива лаборатории биомониторинга, она является лауреатом первой премии в области экологии Правительства Кировской области, её заслуги были неоднократно отмечены грамотами и благодарственными письмами Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, Правительства Кировской области.

Елена Валентиновна – образец настоящего русского интеллигента: выдержанная, внимательная, настоящий трудоголик, высокоэрудированная не только в науке, но и в литературе и искусстве. Поэтому не случайны уважение и благодарность, которые испытывают к ней сотрудники лаборатории и все те, кому посчастливилось с ней работать, общаться, дружить.

Редколлегия журнала сердечно поздравляет Елену Валентиновну с Днём рождения! Желаем крепкого здоровья, дальнейшей плодотворной деятельности на благо нашего журнала, активной исследовательской работы, счастья и благополучия!

*Редколлегия журнала
«Теоретическая и прикладная экология»*

Международный форум «Агробиотехнологии: достижения и перспективы развития»

В Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова в период с 28 по 31 августа 2023 г. проходил Международный форум «Агробиотехнологии: достижения и перспективы развития», включивший целый комплекс мероприятий, связанных актуальной повесткой. Инициатором форума выступил факультет почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова. В организации масштабной встречи учёных, представителей бизнеса и некоторых управленческих структур на площадках Международной научно-практической конференции под названием «Биологизация землепользования: почва, технологии, продукция», IV международного симпозиума «Биодиагностика и экологическая оценка окружающей среды: современные технологии, проблемы и решения», а также Международной молодёжной научной школы «Ремедиация почв: инновационные подходы к восстановлению экологических функций» приняли участие биологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, ФИЦ «Почвенный институт имени В.В. Докучаева», Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, компания «Иннопрактика». Более 270 участников из разных городов России, Кыргызстана, Узбекистана, Республики Беларусь, Таджикистана, а также работающие и обучающиеся в России молодые учёные из Индии, Китая, Эквадора, Колумбии проявили интерес к этому событию.

Актуальность повестки форума обусловлена растущим спросом населения на органическую продукцию. Удовлетворение такого спроса невозможно представить без обеспечения экологически чистых источников сырья, воспроизводства плодородия почв и продуктивности аквахозяйств, без защиты растений от болезней и вредителей с помощью безопасных агрохимикатов. Участники единодушны в том, что важнейшей проблемой на пути решения этих вопросов остаётся необходимость усовершенствования критериев и схем оценки экологического качества почв, безопасности природных сред. Об этом речь шла в выступлениях учёных из ведущих исследовательских центров и университетов Москвы, Санкт-Петербурга, Кирова, Красноярска, Сургута, Саратова, Ростова-на-Дону, Тольятти, Томска. В ходе обсуждения вопро-

сов, связанных с повышением эффективности такой оценки, в повестке IV международного симпозиума «Биодиагностика и экологическая оценка окружающей среды: современные технологии, проблемы и решения», чётко обозначились тренды на привлечение инновационных разработок, инструментальных методов и современных биоинформационных технологий в лабораторные и мониторинговые натурные исследования.

Живой интерес вызвала выставка «Агро-ЭкоБиотех – МГУ 2023», на которой компании-участники (ООО «Лигногумат», ООО «Иннагро», ООО «Европолитест», ООО «ТехноНИКОЛЬ-Строительные системы», ООО «Биотехкомп», ООО «Биота», ООО «Биопрепараты», ООО «Хэбараги», ООО «ЦИОН РУС», ООО «НВП БашИнком») представили разнообразные агrobiотехнологические продукты, безопасные субстраты для тепличных растений, приборы и оборудование для биотестирования из Москвы, Саратова, Сургута и Красноярска. Разработчики и производители оборудования приняли участие в проведении мастер-класса «Технологии биотестирования в экологическом контроле», который в расширенном варианте регулярно проводится на факультете почвоведения МГУ и является неотъемлемой составляющей программы повышения квалификации экологов (<https://www.letap-msu.ru/>).

Молодым учёным была предоставлена возможность в рамках молодёжной научной школы обсудить актуальные проблемы оценки и восстановления почв, нарушенных в результате природных и техногенных воздействий. При активном участии Студенческого научного общества МГУ молодые учёные поделились результатами своих исследований и разработок, получили ценные советы от старших коллег. По итогам конкурса презентаций определены победители и вручены дипломы. Ведущие учёные прочитали интереснейшие лекции об уникальных биосорбентах токсикантов, полимерных плёночных композитах против эрозии почв, об угрозах чрезмерного распространения фармпрепаратов и антибиотикорезистентности, о проблемах и возможностях нанотехнологий в сельском хозяйстве.

В рамках конференции состоялся круглый стол, посвящённый обсуждению проекта

Министерства просвещения РФ и Министерства сельского хозяйства РФ «Агроклассы России». Целью данного мероприятия было рассказать о результатах развития агроклассов и агрообъединений в образовательных организациях России, обсудить систему агроэкологического образования и привлекательность современных инновационных форм сельскохозяйственного производства для детей и подростков.

Итоги форума представлены резолюцией, в которой отмечается необходимость дальнейшего сотрудничества научных работников, специалистов в области экологии и сельского хозяйства, представителей сферы агробизнеса. Только сообща можно решать актуальные задачи обеспечения населения экологически безопасной и качественной продукцией, а также находить решения и способы сохранения окружающей среды, поддержания нормального функционирования почв как важнейшего фактора окружающей среды.

Также были сформулированы рекомендации и предложения Совету по профессиональным квалификациям аграрно-промышленного комплекса, вузам, Министерству сельского хозяйства РФ, Комитету по аграрным вопросам Государственной Думы и Комитету Государственной Думы по экологии, Роскачеству.

Присланные статьи и тезисы докладов конференции (doi: 10.61271/n3559-8999-6385-v), симпозиума (doi: 10.61271/j8240-4277-2929-x) и молодежной школы (doi: 10.61271/m2951-7818-4458-g) опубликованы в трёх отдельных сборниках.

Финансовую поддержку форуму оказали фонд «Органика», компании «Лигногумат», «Иннагро», СПАО «Ингосстрах».

Члены организационного и программного комитетов форума

*В. А. Терехова, д. б. н., профессор,
С. А. Кулачкова, к. б. н.,
Е. В. Морачевская, к. б. н.*

Уважаемые коллеги!

Приглашаем Вас принять участие в работе
V Всероссийского научного форума
«Утилизация отходов производства
и потребления: инновационные подходы и технологии»
г. Киров, 14–15 ноября 2023 г.

В рамках форума будут проходить:

1. V Всероссийская научно-практическая конференция «Технологии переработки отходов с получением новой продукции»
2. XXI Всероссийская конференция с международным участием «Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем»
3. V Всероссийский молодежный конкурс научно-исследовательских проектов «Разработка методов и технологий обращения с отходами производства и потребления, организация экологического мониторинга»
4. Интеллектуальная игра для студентов «Zero Waste»

Организаторы: ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», ФГУП «ФЭО», Информационный центр по атомной энергии Кирова, Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук.

Контакты:

<http://envjournal.ru/ecolab/knf.php>

e-mail: confbioeco@gmail.com

Тел. 8(8332)37-02-77

Ответственный секретарь М. Л. Сазанова

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ «АГРОБИОТЕХНОЛОГИИ: ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ»



Индекс ПС248



ISSN 1995-4301



9 771995 430004